



Technická univerzita
v Liberci
Fakulta strojní

Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Katedra vozidel a motorů
Hálkova ul. 6
CZ-46117 Liberec

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Sledování technického stavu katalytického reaktoru v systému EOBD

Monitoring of technical condition of catalytic converter
under EOBD

Petr Teichmann
Ev. č. 553565
PSM FS5

2007-01-05

<u>Vydavatel (DC.PUBLISHER)</u>	<i>Technická univerzita v Liberci Fakulta strojní Katedra vozidel a motorů Hálkova ul. 6 CZ-46117 Liberec</i>
<u>Název (DC.TITLE)</u>	<i>Sledování technického stavu katalytického reaktoru v systému EOBD (ENG) Monitoring of technical condition of catalytic converter under EOBD</i>
<u>Předmět a klíčová slova (DC.SUBJECT)</u>	<i>spalovací motor, katalyzátor, emise, diagnostika, EOBD</i>
<u>Typ zdroje (DC.TYPE)</u>	<i>Diplomová práce</i>
<u>Tvůrce (DC.CREATOR)</u>	<i>Petr Teichmann</i>
<u>Příspěvatel (DC.CONTRIBUTOR)</u>	<i>Vedoucí diplomové práce: Josef Laurin (TU Liberec) Konzultant: Harald Loeck (Volkswagen AG, Wolfsburg)</i>
<u>Identifikátor zdroje (DC.IDENTIFIER)</u>	<i>Diplomová práce: Studijní program: M2301 strojní inženýrství Studijní obor: 2302T010 konstrukce strojů a zařízení Zaměření: Pístové spalovací motory</i>
<u>Datum vytvoření (DC.DATE.CREATION)</u>	<i>2007-01-05</i>
<u>Formát (DC.FORMAT)</u>	<i>Adobe Portable Document Format, Adobe PostScript</i>
<u>Jazyk (DC.LANGUAGE)</u>	<i>CES</i>
<u>Bibliografické informace</u>	<i>Rozsah práce: Počet stran: 85 Počet obrázků: 34 Počet tabulek: 11 Počet příloh: 1 ks CD-ROM</i>
<u>Správa autorských práv (DC.RIGHTS)</u>	<i>rozšiřování/distribuce omezena</i>

Analytický list zpracován dle norem ISO 15836:2003 a ISO 5966:1982

Abstrakt

Současné požadavky na snižování emisní zátěže vedou i ve vývoji konstrukce spalovacích motorů k hledání nových technologií pro zlepšování emisních parametrů motorů. V případě zážehových benzínových motorů byly hledány postupy měření a zpracování parametrů katalyzátoru výfukových plynů během provozu tak, aby přesnější data umožňovala jak další vývoj v oblasti konstrukční a v oblasti vnitřní regulace, tak i podklady pro výzkum. Na pokusném motoru byly zkouškami spočívajícími především v jízdních testech pořízeny soubory dat. K jejich zpracování byl navržen inovovaný způsob práce s daty pořízenými na základě právě standardizovaných testů. Soubor navržených inovativních postupů spočíval jak v nových matematických tak i programových (manuálních i automatických) nástrojích. Zpracování a vyhodnocení pořízených dat ukázalo na kvalitativní přínosy při použití souboru těchto nástrojů.

Current requirements for reducing of exhaust exposition force the designer of internal combustion engines to find and use the new technologies for improvements of its exhaust parameters. There were been looked for such measurements and computing of catalytic converter parameters in the case of petrol engines, to more accurate internal control and receiving another bases for research. There have been sampled many sets of data on the testing engine during many test driving cycles. There have been suggested set of improved procedures (mathematical and software) and tools (manual and automatic). Treatment and interpretation of those data sets have showed on qualitative acquisition by using these tools.

Věnování

Tuto práci věnuji svým rodičům **Nadě a Janu Teichmannovým** a bratrovi **Jenovi** za stálou podporu, kterou mi vždy poskytovali a přítelkyni **Jitce**, bez níž by tato práce nikdy nebyla vznikla.

Dohoda o uchování v tajnosti

Zde předložená diplomová práce byla zpracována v oddělení K-EFVT (Verbrennungsantriebe Thermodynamik) (Spalovací pohony, termodynamika) podniku Volkswagen AG ve Wolfsburgu.

Tato práce se týká částečně výzkumných oblastí, které mimo podnik Volkswagen AG nejsou známy a proto podléhají povinnosti uchování v tajnosti.

Zavazuji se tímto, že po dobu příštích pěti let nebudu získané znalosti bez předchozího písemného souhlasu podniku Volkswagen AG ani zveřejňovat ani je neposkytnu v jiné formě třetím osobám.

Wolfsburg, duben 2002

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s použitím uvedené literatury a dalších pramenů a na základě konzultací s kožultantem a vedoucím diplomové práce.

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.), budou-li respektována všechna omezení vyplývající z části *Dohoda o uchování v tajnosti* (p. 2).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu prokazatelných nákladů vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Liberec, leden 2007

Zadání úkolu

Vývoj alternativního postupu ke sledování stáří katalyzátorů s pomocí statistických korelačních pozorování (v prostředí MATLAB)[®].

Aby byla zajištěna slučitelnost s životním prostředím u vozidel poháněných spalovacími motory po dobu celé jejich životnosti, předepisují americké úřady pro ochranu životního prostředí pro všechna vozidla, která jsou schvalována pro americký trh, trvalé sledování (OBD) činnosti katalyzátorů.

Sériová vozidla v současné době používají metodu měření prostřednictvím porovnávání signálů od λ -sond před a za katalyzátorem a porovnáním těchto veličin jako nepřímou míru stáří katalyzátoru.

Úkolem této práce bylo vypracování alternativní metody ke sledování účinnosti katalyzátoru s pomocí statistických vyhodnocovacích metod používajících stávající eventuelně přídavné sensory výfukových plynů.

Pro použití metody jsou k dispozici soubory naměřených dat ze zkušebních vozidel s katalyzátory rozdílného stupně stáří při normovaných jízdních cyklech (FTP, NEFC, HDC) na zkušebním stavu.

Obsah

0	Úvod	13
0.1	Předmluva	13
0.2	Metodika řešení	15
1	Dodatečné zpracování výfukových plynů	17
1.1	Katalyzátor	17
1.1.1	Stavba 3-cestného katalyzátoru	18
1.1.2	Poškození a stárnutí katalyzátorů	18
1.2	Možnosti a snímače měření emisí	18
1.2.1	Měření součinitele přebytku vzduchu λ	20
1.2.2	Měření koncentrací oxidů dusíku	21
1.2.3	Další měřicí zařízení	26
2	Struktura měřicí techniky	28
2.1	Motorové zkušební stanoviště	28
2.2	Vozidlové válcové zkušební stanoviště	28
2.3	Metody zpracování emisí z jízdního cyklu	30
2.3.1	Metoda CVS	30
2.3.2	Další sběrné způsoby	30
3	Realizace jízdních testů	32
3.1	Vozidlo a motor	32
3.2	Elektronická řídicí jednotka motoru	32
3.3	Měřicí aparatura	33
3.3.1	ASCET	37
3.4	Použité katalyzátory	38

4	Metody monitorování stavu katalyzátoru	40
4.1	Amplitudová analýza se dvěma λ -sondami	40
4.2	DKATSP	40
4.3	Integrální kritérium KZK	42
5	Zpracování naměřených výsledků	43
5.1	Prvotní zpracování dat	43
5.1.1	Načtení dat	43
5.1.2	Interpolace a vzorkování	43
5.1.3	Harmonizace a uložení	44
5.2	Druhotné zpracování dat	44
5.2.1	Regresní (automatická) synchronizace	44
5.2.2	Synchronizace s nekonstantním časovým posunem . .	46
5.2.3	Manuální synchronizace	47
5.3	3D-závislosti	51
5.3.1	Regresní analýza - program AUTOREG	51
5.3.2	Interpolační matice	51
6	Závěr a výhled	56
7	Poděkování	58
	Seznam literatury	59
	Přílohy	61
A	Paliva, spalování a výfukové emise	61
A.1	Ropa	61
A.2	Rafinace	62
A.2.1	Separace, oddělování	62
A.2.2	Konverze	63
A.2.3	Dodatečné úpravy a zušlechťování	65
A.3	Paliva pro zážehové motory	66
A.3.1	Požadavky na paliva do zážehových motorů	67
A.3.2	Metody ke splnění požadavků na benzíny	68

A.4	Tvorba směsi a spalování	69
A.5	Výfukové emise	71
A.5.1	Složení výfukových plynů zážehových motorů	71
A.5.2	Vlastnosti a působení jednotlivých komponent výfukových plynů na člověka	72
A.5.3	Emisní zákonodárství	76
B	Seznam vytvořených programů a rutin	79
C	CD-ROM	81

Seznam obrázků

1	Spotřeba paliva v Německu	14
2	Srovnání počtu vozidel a spotřeby	14
1.1	Uspořádání snímačů ve výfukovém potrubí	20
1.2	Schéma uspořádání širokopásmové λ -sondy	21
1.3	Schéma uspořádání a charakteristiky λ -sondy LSF	22
1.4	Schéma činnosti NO_x -sensoru	25
1.5	Optický princip FTIR spektrometru v analyzátoru SESAM	26
1.6	Princip FID analyzátoru	27
2.1	Snímek zkušebního stanoviště	29
3.1	Schéma použitého motoru	33
3.2	Elektronická řídicí jednotka motoru	34
3.3	Schéma architektury měřicí aparatury	35
3.4	Uspořádání měřicí aparatury v zavazadlovém prostoru	36
3.5	Uspořádání měřicí aparatury v kabině	36
3.6	Uspořádání měřicí aparatury vně vozu	37
3.7	Schéma zapojení jednotky ASCET	38
4.1	Diagram funkce DKATSP	41
5.1	Ukázka okna mansync v nesynchronizované podobě	49
5.2	Ukázka okna mansync v synchronizované podobě	50
5.3	Dynamická 3D-závislost $\text{NO}_{x\text{CLD}}$, mediánový faktor 1	52
5.4	Dynamická 3D-závislost $\text{NO}_{x\text{CLD}}$, mediánový faktor 5	53

5.5	Dynamická 3D-závislost $\text{NO}_{x\text{CLD}}$, mediánový faktor 10	53
5.6	Statická 3D-závislost $\text{NO}_{x\text{CLD}}$, mediánový faktor 1	54
5.7	Statická 3D-závislost $\text{NO}_{x\text{CLD}}$, mediánový faktor 5	54
5.8	Statická 3D-závislost $\text{NO}_{x\text{CLD}}$, mediánový faktor 10	55
5.9	Regresní 3D-závislost $\text{NO}_{x\text{CLD}}$	55
A.1	Hydroskimming rafinérie	63
A.2	Konverzní rafinérie	64
A.3	Komplexní krakovací rafinérie	64
A.4	Složení výfukových plynů zážehového motoru	71
A.5	Závislost koncentrací škodlivin na λ	72
A.6	Charakteristika testu FTP	74
A.7	Charakteristika testu MVEG	75
A.8	Charakteristika testu HDC	75

Seznam tabulek

1.1	Parametry katalyzátorů	18
1.2	Vliv teploty na katalyzátor	19
2.1	Parametry zkušebního stanoviště	29
2.2	Parametry motoru AQY	31
2.3	Parametry motoru AEG	31
3.1	Přehled katalyzátorů použitých v testech	39
5.1	Struktura proměnné stati	45
5.2	Jádro algoritmu rutiny regsync	47
A.1	Složení benzínů	66
A.2	Předepsané limity emisí do 2000	77
A.3	Předepsané limity emisí od 2004	78

Seznam zkratek

Následující seznam obsahuje některé použité a méně obvyklé zkratky a označení.

zkratka	význam	překlad
ASCET	A dvanced S imulation and C ontrol E ngineering T ool	součást HW řešení měřicí aparatury
cf.	c onfer	srovnej
cft	c ubic f oot	28.317 dm ³
CLD	C hemiluminiscent D etector	chemoluminiscenční detektor
cpi	c ells p er i nh	buněk na palec
CVS	C onstant V olume S ampling	odběrná metoda výfukových plynů
EOBD	E uropean O nboard D iagnosis	evropská palubní diagnostika
ETK	E mulatortastkopf	emulační modul řídicí jednotky
FFT	F ast F ourier T ransformation	rychlá Fourierova transformace
FID	F lame-Ionisation D etector	ionizační plamenový detektor
FTIR	F ourier T ransformation I nfrared spectrometer	infračervený spektrometr
FTP	F ederal T est P rocedure	federální jízdní test (USA)
GUI	G rafical U ser I nterface	grafické uživatelské prostředí
HDC	H ighway D riving C ycle	dálniční jízdní test
KZK	K atalysatorzustandskennzahl	vyhodnocovací ukazatel katalyzátoru
LA3		externí širokopásmová λ-sonda
LSF	L ambdasonde- F lach	λ-sonda s plochou charakteristikou
LSH	L ambdasonde- H eizung	vyhřívaná λ-sonda
LSU	L ambdasonde- U niversal	univerzální λ-sonda
LEV	L ow E mission V ehicle	vozidlo s nízkými emisemi
mil	m iliinch	25.399 μm
MOČ	M otorové O ktanové Č íslo	
MVEG	M otor V ehicle E mission G roup	ekvivalentní označení pro NEFZ
NEFZ	N euer E uropäischer F ahrzyklus	nový evropský jízdní test
NMHC	N on- M ethane hydrocarbons	uhlovodíkové emise bez methanu

zkratka	význam	překlad
NMOG	Non-Methane organic gases	suma všech uhlovodíků ve výfuku
OBD	Onboard Diagnosis	palubní diagnostika
OSC	Oxygen Storage Capacity	kapacita zásoby kyslíku
p.	pagina	strana
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Asociation	standard rozhraní (přenosných) počítačů
PM	Particulate Matter	pevné částice
PZEV	Partial Zero Emission Vehicle.	vozidlo s částečně nulovými emisemi
SOČ	Silniční Oktanové Číslo	
SESAM	System for Emission Sampling And Measurment	měřicí aparatura zn. SIEMENS
SULEV	Super Ultra-Low Emission Vehicle	vozidlo se super ultra-nízkými emisemi
TLEV	Transitional Low Emission Vehicle	vozidlo s přechodně nízkými emisemi
ULEV	Ultra-Low Emission Vehicle	vozidlo s ultra-nízkými emisemi
v.	vide	viz
VOČ	Výzkumné Oktanové Číslo	
ZEV	Zero Emission Vehicle	vozidlo s nulovými emisemi

Kapitola 0

Úvod

0.1 Předmluva

Automobil tvoří dnes důležitou součást naší společnosti. Od první poloviny 20. století získával stále více svůj význam; především ve všech průmyslových zemích. Může sloužit jako mnohostranný dopravní prostředek pro zboží i osoby, poskytovat dosud nepoznanou individuální a flexibilní mobilitu a zvyšovat kvalitu života lidí.

Automobily jsou v převážné většině poháněny spalovacími motory. Protože při spalování fosilních paliv dochází ke vzniku pro životní prostředí i lidské zdraví škodlivých výfukových plynů, vedl tento razantní nárůst v posledních letech ke vzniku některých negativních jevů. Dva nejdůležitější jsou:

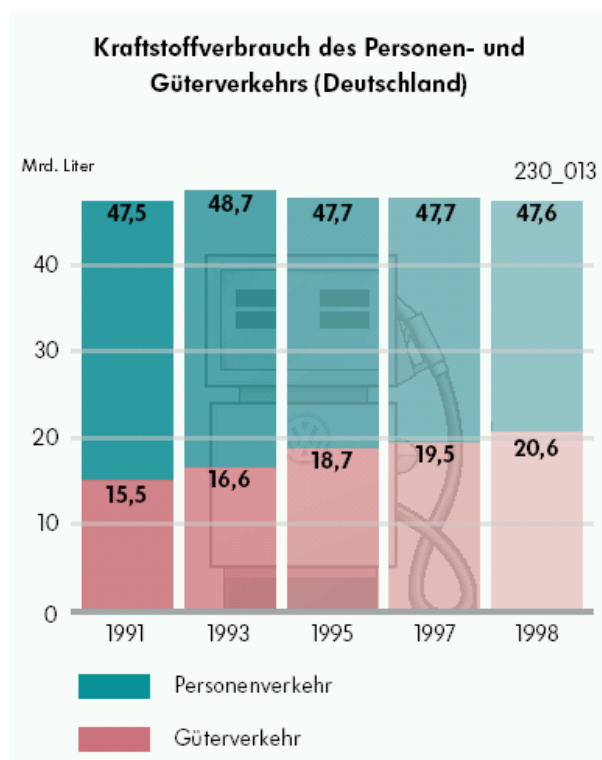
- jen omezené zásoby surovin použitelných pro výrobu paliv a
- znečištění životního prostředí emitovanými škodlivinami.

Na to reagovali zákonodárci mnoha zemí nejdříve zavedením a později zpřísněním mezních hodnot pro nejdůležitější výfukové škodliviny.

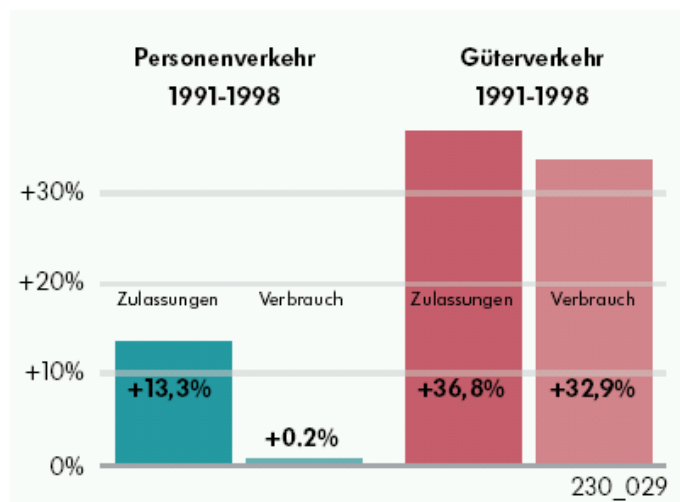
Pro snížení výfukových emisí mají výrobci vozidel k dispozici zásadně dvě možnosti ke splnění zákonných limitů:

- snížit spotřebu paliva a tak i výfukových emisí a/nebo
- dodatečnou úpravou zplodin

Již dnes velmi nízká množství povolených emitovaných zplodin, která budou v budoucnu jistě ještě zpřísněna, nutí výrobce automobilů k nasazení celkem komplikovaných systémů nejen řízení motoru, ale i dodatečné úpravy výfukových zplodin. Ale tyto systémy nejsou nezávislé, nýbrž tvoří vlastně jeden komplexní systém. Dnes platné exhalační normy předepisují sledování stavu katalyzátoru. V budoucnu bude jistě nutné sledovat všechny systémové komponenty, zodpovědné za kvalitu výfukových plynů.



Obrázek 1: Vývoj spotřeby paliva v 90. letech 20. století v Německu [10]



Obrázek 2: Srovnání mezi počty schvalovaných vozidel a spotřebou paliva u osobní dopravy ukazuje, že se celková spotřeba i při rostoucích počtech vozidel zvyšovala jen minimálně. [10]

0.2 Metodika řešení

V této diplomové práci jde o hledání takových matematických a statistických postupů, které by mohly nabídnout zlepšení alternativních diagnostických metod. Všechny výpočty se zakládají na parametrech a pokusných měřeních konkrétního 4-válcového řadového zážehového motoru. Přesnější technické parametry tohoto motoru jsou v části 3.1 (p. 32). Nejruznější použité katalyzátory jsou v části 3.4 (p. 38).

Metodami použitelnými ke zjišťování stavu a činnosti katalyzátoru se zabývá kapitola 4 na straně 40.

- Metodu dvou λ -sond (sondy LSU před katalyzátorem a sondy LSF za katalyzátorem) s pouze pasivním vyhodnocováním amplitudy signálů z obou dvou bylo lze použít do emisní úrovně ULEV včetně. S příchodem dalších přísnějších omezení se tato metoda stala nepoužitelnou. Více o této metodě v části 4.1 (p. 40).
- Aktivní metodou sice opět založenou na použití dvou λ -sond je postup zvaný DKATSP, který již vyžaduje konkrétní aktivně navozované pracovní stavy motoru pro řádný průběh analýzy. Tato metoda diagnostiky katalyzátoru je sériově použita ve vozidlech pro trh v USA ke splnění požadavků OBD II. Proto byla použita i v testovacím vozidle, aby mohla být porovnávána s ověřovanou metodou KZK a dalšími. Více o této metodě v části 4.2 (p. 40).
- Jako alternativa k metodě DKATSP byla zkoumána vyvíjená metoda označená KZK, založená na posuzování stavu katalyzátoru pomocí integrálního kritéria KZK, které je vypočítáváno během konkrétních jízdních stavů vozidla z kumulovaných koncentrací oxidů dusíku měřených NO_x -sensorem a energie vynaložené v příslušném časovém úseku. Více v části 4.3 (p. 42).
- Vzhledem k tomu, že metoda KZK nevykazovala zcela použitelné výsledky pro všechny typy jízdních testů, bylo nutno analýzou naměřených dat hledat způsob jejího zpřesnění. Jako cesta vedoucí k tomuto zpřesnění se ukázalo především odstranění různých zpoždění měřených signálů jejich vzájemnou synchronizací. K tomu byly vytvořeny mnohé výpočetní nástroje v prostředí MATLAB®. Jako velice užitečný nástroj při analýze vlivu těchto zpoždění na výsledek diagnostických metod stavu katalyzátoru se ukázala rutina mansync s grafickým rozhraním GUI vytvořená sice právě k tomuto účelu, ale použitelná univerzálně. Více v části 5.2 (p. 44).
- Při numerickém zpracování naměřených dat se jako jisté negativum ukázala právě nutnost existence celého nebo alespoň částečného souboru naměřených hodnot, který je zpětně vyhodnocován. To by mohla být

vážná komplikace při nasazení metody v reálném čase a tak byly vytvořeny takové charakteristiky, které skýtají další potenciál zjišťování stavu činnosti katalyzátoru, aniž by si vynucovaly zpětné zpracování naměřených souborů dat. Touto problematikou se zabývá část 5.3 (p. 51).

V této práci je užito výhradně syntaxe, symboliky a konvencí obvyklých v programovém prostředí MATLAB[®], tedy včetně užití desetinné tečky namísto desetinné čárky.

Kapitola 1

Dodatečné zpracování výfukových plynů

Tímto pojmem se rozumí zejména množina chemických postupů, které vedou k takové změně emisí produkovaných motorem¹, aby byly splněny především zákonné emisní limity. Drtivá většina těchto procesů probíhá v *katalytickém reaktoru*, neboli *katalyzátoru*.

1.1 Katalyzátor

Podstatou katalytických reaktorů výfukových plynů jsou chemické reakce probíhající mezi jednotlivými složkami přiváděných výfukových plynů. Ty probíhají za přítomnosti katalyzátorů (aktivátorů chemické reakce), kterými jsou nejčastěji drahé kovy (Pt, Rh, Pd) a které - byť se chemické reakce účastní - nejsou spotřebovávány jako reaktanty. Aby tyto reakce probíhaly dostatečně rychle a stabilně je potřeba splnit dvě podmínky: zajistit optimální teplotu reaktantů a co možná největší styčnou plochu na které se molekuly plynů mohou dostat do kontaktu s katalyzátorem. Podmínku první lze splnit poměrně snadno, protože horké výfukové plyny budou jistě ochotněji reagovat než chladné. Podmínku druhou lze splnit použitím takových uspořádání nosné hmoty katalytického reaktoru a jejího povrchu, aby byl co nejčlenitější. Na tento členitý povrch je pak nanesen vlastní katalyzující materiál.

Přesnější údaje o použitých katalyzátorech poskytuje část 3.4 (p. 38).

¹Na tomto místě je třeba upozornit na důležitý fakt: hovoříme-li o emisích, můžeme myslet emise *surové* (něm. *Rohemissionen*), neboli ty, které vystupují přímo ze spalovacího prostoru motoru, tedy **emise před katalyzátorem**, nebo ale můžeme myslet emise finální, tedy ty, které opouštějí výfukový systém vozidla, tedy **emise za katalyzátorem**. Z hlediska zákonných limitů se jedna vždy o emise za katalyzátorem, v případě diagnostiky katalyzátoru a řízení motoru všeobecně může jít o oba druhy.

1.1.1 Stavba 3-cestného katalyzátoru

Stavba 3-cestného katalyzátoru je principiálně zřejmá z obr. 1.1, p. 20: v ocelové nádobě (nejčastěji z ušlechtilé oceli) jsou upevněny dva kusy příslušné nosné hmoty, na níž je nanесena vrstva katalyzujícího materiálu. Tak je vytvořen dvoustupňový katalyzátor, sestávající z katalyzátoru předřadného (něm. *Vorkat*) a hlavního katalyzátoru (něm. *Hauptkat*).

1.1.2 Poškození a stárnutí katalyzátorů

Jde o poměrně velice komplexní problematiku přesahující rozsah této práce. Za připomenutí však stojí alespoň dva faktory, které zásadně ovlivňují funkci katalyzátoru:

- teplota: zejména vysoká teplota může zásadním způsobem ohrozit funkci katalyzátoru, popř. snížit jeho účinnost. Představu o účincích a chování katalyzátoru v závislosti na teplotě ilustruje tab. 1.2 (p. 19). Právě teplotou lze však také realizovat i cílené umělé stárnutí katalyzátorů, využitelné při podobných pokusech. Více v. např. [1] nebo [3].
- přítomnost nežádoucích prvků či sloučenin ve spalínách: zejména přítomnost prvků jako Pb, P, S, Zn, Cl, Br nebo Cu může být pro katalyzátor zcela fatální. Tyto prvky (ale například i větší množství nespáleného paliva) způsobují tzv. *otrávení* katalyzátoru a jeho často definitivní vyřazení z činnosti.

Katalyzátor		předřadný	hlavní
nosič		Corning	
účinná vrstva		Dmc ² (Degussa)	
typ		MLK×5 100g/cft nebo 200g/cft	MLK×5 100g/cft
poměr Pd : Rh		14 : 1	14 : 1
rozměry	in.	4.66 × 2.94	4.66 × 2.94
velikost buněk	cpi	900	900
síla stěny	mil	2	2

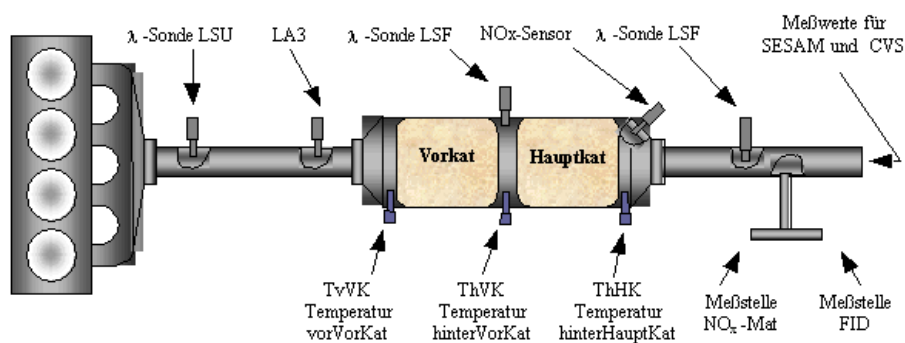
Tabulka 1.1: Technické parametry použitých katalyzátorů [2]

1.2 Možnosti a snímače měření emisí

Následně bude podán hrubý výčet snímačů, měřicích zařízení a způsobů měření emisí, která se dotýkají řešené problematiky. Není možno podat

1400°C	přehřátí	roztavení nosiče
		měknutí nosiče
		strukturální změny nosiče
	velmi silné poškození	uvolnění washcoatu
1000°C		spékání Pt/Rh
	přechodová fáze	přechod $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ na $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
	silné termické stárnutí	ztráta pórovitosti washcoatu
	slabé znečištění	spékání Pt/Pd
800°C		
	pracovní oblast	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ se spéká se zbytky oleje a paliva (Mg, Zn etc.)
	střední termické stárnutí	
	slabé znečištění	
	slabé termické stárnutí	
600°C		optimální účinek
	silné znečištění	
	náběh staršího kat. po ca. 80 000 km náběh čerstvého kat.	
200°C		
žádná aktivita		

Tabulka 1.2: Vliv dosažené teploty na stav a činnost katalyzátoru [3]



Obrázek 1.1: Uspořádání snímačů ve výfukovém potrubí[2]

komplexnější rozbor jednotlivých elementů, protože by přesahoval rámec této práce a odkazuji tímto tedy čtenáře k prostudování příslušné literatury. Především je třeba si uvědomit, že je nutno rozlišovat měření (a měřicí přístroje), která lze provádět během jízdních testů (tedy de facto v laboratorních podmínkách) a potom měření (a snímače), která a které lze využít v běžném provozu a tedy při eventuálním sériovém nasazení ve vozidlech. Je zřejmé, že v podmínkách laboratorního měření bude snazší získat přesnější a komplexnější údaje o měřených veličinách. Což sice může být nápomocné při hledání nových diagnostických metod, ale na druhou stranu si také vynucuje provádět komparační měření s méně přesnými snímači použitelnými případně při sériovém užití na voze.

Schéma uspořádání snímačů použitých při realizovaných jízdních testech je na obr. 1.1, p. 20.

1.2.1 Měření součinitele přebytku vzduchu λ

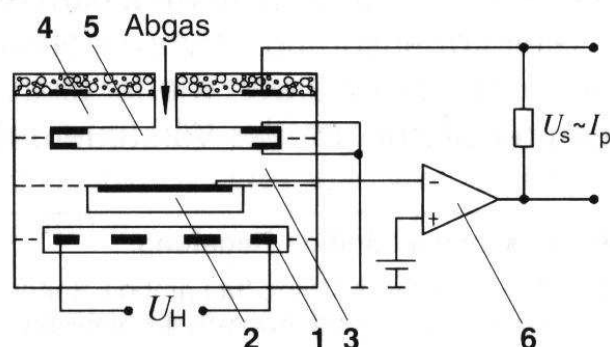
Toto měření je zcela nezbytné i z hlediska řízení provozu vlastního motoru, takže příslušné snímače (zvané λ -sondy) jsou již poměrně dobře prozkoumanou a známou oblastí. Bude tedy proveden pouze stručný přehled jednotlivých použitých druhů těchto snímačů.

- LA3: externí širokopásmová λ -sonda její uspořádání zachycuje obr. 1.2, p. 21.
- LSF: λ -sonda s plochou charakteristikou se vyznačuje sice úzkým pásmem použitelnosti, ale poskytuje velice přesné hodnoty. Její uspořádání i charakteristiky zachycuje obr. 1.3, p. 22.
- LSH: vyhřívaná λ -sonda je zvláštní modifikaci LSF pro specifické použití

Breitband-Lambda-Sonde.

Schematischer Aufbau

1 Heizer, 2 Luftreferenz, 3 Nernstzelle (Zweipunktsonde), 4 Pumpzelle, 5 Diffusionsspalt, 6 Regelelektronik. I_p Pumpstrom, U_H Heizspannung, U_S Sondenspannung.



Obrázek 1.2: Schéma uspořádání širokopásmové λ -sondy[3]

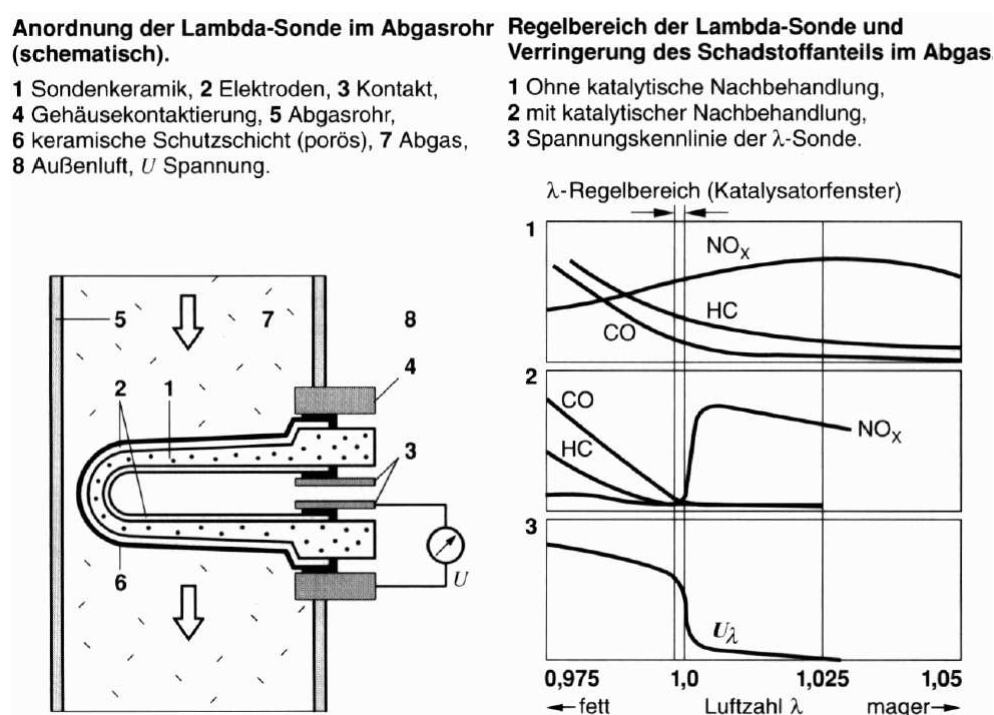
- LSU: univerzální λ -sonda svou stavbou i charakteristikou je podobná sondě LA3

1.2.2 Měření koncentrací oxidů dusíku

NO_x -sensor

NO_x -sensor je poměrně nový a zatím ne příliš obvyklý druh snímače používaného při zpracování výfukových plynů a automobilové technice vůbec. Jak název napovídá, je určen pro měření koncentrací oxidů dusíku. Ty ale měří nepřímo, měřením množství kyslíku vázaného na dusík. K tomu se uvnitř snímače vyskytuje katalytické prostředí, které je schopno redukovat oxidy dusíku ve výfukových plynech. Z takto redukováných oxidů dusíku vzniklé atomy a molekuly kyslíku jsou převáděny zpět do proudu výfukových plynů, přičemž vzniklá iontová nerovnováha je svou intenzitou proporcionalní k redukováným množstvím kyslíku a tím i k množství oxidů dusíku. Tento fyzikální stav je pak již snadno převoditelný na elektrický signál, který je zpracováván a vyhodnocován řídicí jednotkou. K tomu, aby tento měřicí princip byl realizovatelný a poskytoval relevantní údaje, musí být splněny dvě podstatné podmínky:

Konstantní poměr složek oxidů dusíku ve směsi: Poměr, v jakém přítomné



Obrázek 1.3: Schéma uspořádání a charakteristiky λ -sondy LSF[3]

oxidy dusíku vstupují do první komory, nemusí být známý, protože se jedná v podstatě jen o oxidy NO a NO₂. NO₂ sice obsahuje dvojnásobné množství kyslíku proti NO, ale oproti němu difunduje dvakrát pomaleji do první komory. Nicméně je nutné, aby tento vzájemný poměr zůstal konstantní. Když se za určitých podmínek podíl jednotlivých oxidů dusíku uvnitř snímače změní, jedná se o chybná měření, která se nazývají *příčná citlivost* (v. část 1.2.2, p. 24).

Zbytkový kyslík: V katalytickém prostředí nesmí být přítomen žádný kyslík, který by nepocházel z redukce oxidů dusíku. V každé směsi výfukových plynů se však nachází alespoň nepatrný podíl kyslíku, který nazýváme *zbytkovým kyslíkem*. Ten musí být z této směsi ještě před dosažením katalytické vrstvy odstraněn. Kyslík se proto stupňovitě redukuje ve dvou oddělených komorách, k jejichž oddělení slouží difúzní vrstva. V první komoře se sníží podíl kyslíku natolik, že nedochází k samovolné redukci měřeného podílu oxidů dusíku. Ve druhé komoře klesne hodnota koncentrace kyslíku téměř k 0 ppm. Souhra obou komor je řízena kontrolní jednotkou. Téměř současně se uskutečňuje redukování oxidů dusíku v katalytickém prostředí. Tím nevznikají žádná výrazná zpoždění a je také zabráněno samovolné redukci oxidů dusíku a tím možnému ovlivnění výsledků měření. Protože plnohodnotné odstranění zbytkového kyslíku není možné, zohlední se stále ještě přítomné množství molekul kyslíku superpozicí výsledku měření s offsetovou hodnotou.

Principiální schéma uspořádání snímače představuje obr. 1.4 (p. 25):

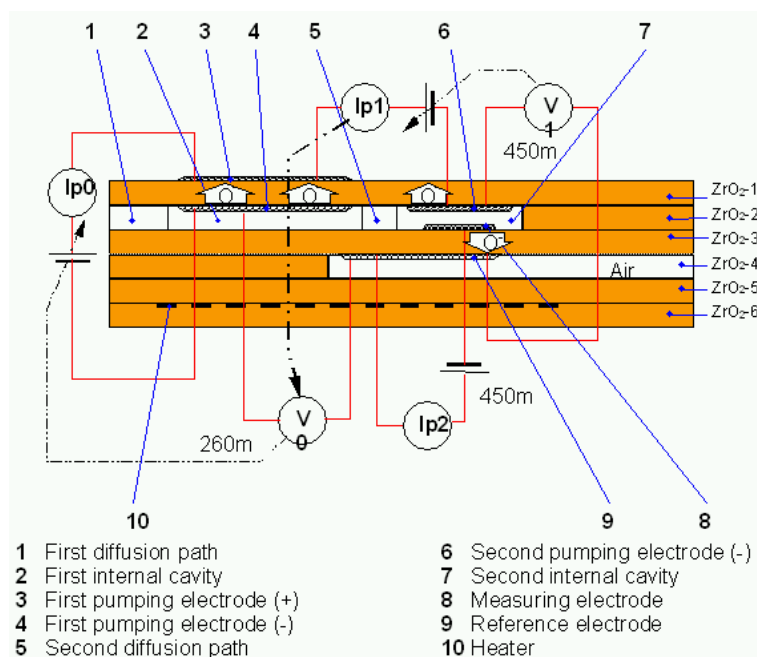
První vnitřní komora: Měřený plyn se dostává difúzním průchodem ① do první vnitřní komory ②. V této komoře se nachází záporně nabitá elektroda ④ z platiny, která je jednak součástí *kyslíkové pumpy*, druhak součástí buňky pro měření kyslíku. Na vnější straně vrstvy oxidu zirkoničitého ZrO₂-1 se nalézá kladně nabitá elektroda ③, která společně se záporně nabitou elektrodou tvoří první *kyslíkovou pumpu*. Ta slouží k udržování koncentrace kyslíku v první vnitřní komoře na pevně zadané hodnotě. Touto *kyslíkovou pumpou* je kyslík buď přičerpáván z okolního prostředí nebo naopak z výfuku odčerpáván, čímž se molekuly kyslíku na elektrodách nabíjejí. Mezi rozdílně nabitými elektrodami vzniká a skrz vrstvu oxidu zirkoničitého prochází proud iontů. První buňka pro měření kyslíku zajišťuje stálou koncentraci zbytkového kyslíku v první komoře. Tato buňka sestává z první záporně nabitě platinové elektrody ④ a referenční elektrody ⑨, která je obklopena čerstvým vzduchem. Na obou těchto elektrodách se vytvářejí rozdílová napětí pokud koncentrace kyslíku jsou rozdílné v obou měřených prostředích. S pomocí tohoto napětí lze tedy průběžně zjišťovat okamžitý podíl kyslíku uvnitř komory. Elektronická řídicí jednotka pak reguluje velikost proudu, který protéká první *kyslíkovou pumpou*.

Druhá vnitřní komora: Měřený plyn se sníženým obsahem kyslíku prochází druhým difúzním průchodem ⑤ do druhé vnitřní komory ⑦. V této komoře se nalézají dvě elektrody. První elektroda ⑥ je opět záporně nabitá a plní stejnou úlohu jako v první komoře. Druhá elektroda je měřicí ⑧ a společně s referenční elektrodou tvoří buňku pro měření oxidů dusíku. Druhá *kyslíková pumpa* by v ideálním případě měla zbytkový kyslík v přiváděném plynu redukovat na 0 ppm. Ve skutečnosti se dosahuje redukce 0.01 ppm. Tato chyba může být při současném měření kyslíku vznikajícího při redukci oxidů dusíku vyrovnávána přičtením konstantní (offsetové) hodnoty. Regulace činnosti druhé *kyslíkové pumpy* se uskutečňuje prostřednictvím buňky pro měření kyslíku, která sestává z elektrody ⑧ a elektrody ⑨. Nakonec se oxidy dusíku, které se vyskytují v přiváděné směsi prosté kyslíku díky katalytickým vlastnostem měřicí elektrody, redukuje, přičemž vznikající kyslíkové molekuly mají výhradně původ v oxidech dusíku z výfukových plynů a díky náboji elektrody jsou převedeny na ionty a *kyslíkovou pumpou* (⑧ a ⑨) odčerpány. Buňka pro měření oxidů dusíku je vytvořena na konci druhé komory a sestává z měřicí elektrody ⑧ a referenční elektrody ⑨, která sama je obklopena čerstvým vzduchem. Měřicí elektroda je vytvořena z rhodia, které má redukční vlastnosti vzhledem k dusíku.

Příčinou citlivosti NO_x -sensoru se nazývají dva typy situací, při kterých snímač poskytuje odchylné hodnoty od reálné koncentrace NO_x . Vzhledem k tomu, že se jedná o v podstatě reálné pracovní stavy motoru, je vhodné se o obou zmínit [7], [8]:

Výpadek při chudé směsi: Tento případ a současně odchylka naměřené hodnoty od skutečného obsahu NO_x ve výfukových plynech nastane vždy, když v momentě, kdy je motor (vozidlo) pohybován setrvačnou silou, dojde k zastavení dodávky paliva. V tom okamžiku je $\lambda \gg 0$, tzn. že příčinou rapidního vzestupu naměřených hodnot je citlivost snímače ke kyslíku. Následně dochází k razantnímu poklesu hodnot do oblasti záporných ppm a opětovný strmý nárůst. Toto vše v časovém intervalu od 5 s do 10 s.

Výpadek při bohaté směsi: V okamžicích akceleraace, při studeném startu a v počáteční fázi testu se směs obohacuje a hoření tedy nemůže proběhnout dokonale, přičemž vzniká volný vodík (H_2), který společně s NO reaguje na amoniak NH_3 . Amoniak vzniká zejména při dosažení dolní teplotní hranice katalyzátoru (ca. 400-450 °C). Amoniak silně ovlivňuje měření NO_x , protože uvnitř první komory NO_x -sensoru reaguje při $\lambda = 1$ na NO_2 a znehodnocuje tak měření.



Obrázek 1.4: Principiální schéma činnosti a funkce NO_x -senzoru [3]

NO_x -MAT

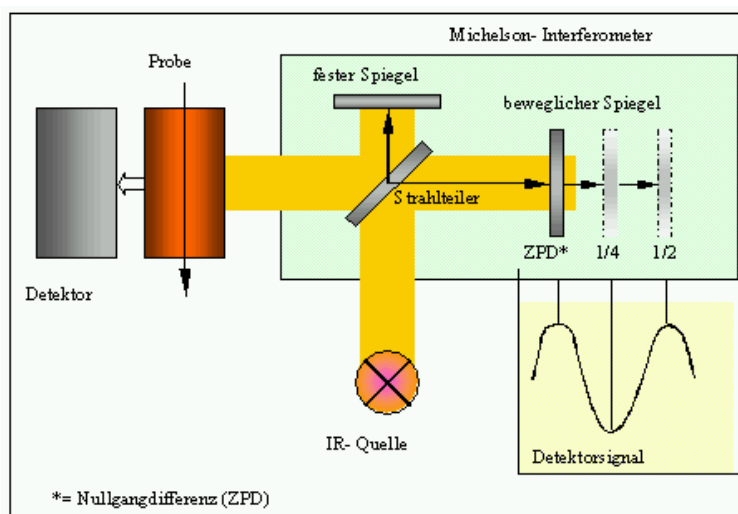
Chemoluminiscenční analyzátor (CLD) určuje sumu oxidů dusíku v emisích na principu chemoluminiscenčního jevu. Ten spočívá ve snímání světelné energie emitované během chemických reakcí, kdy se přeskupované elektrony dostávají na nižší energetickou hladinu a přebytečnou energii emitují ve formě světla. Světelná energie se převádí na elektrický signál a ten se zaznamenává.

V měřicím zařízení z oxidu dusnatého a ozónu vzniká oxid dusičitý a molekulární kyslík. Potřebný ozón je vyráběn v samotném měřicím přístroji z externě přiváděného syntetického vzduchu.

Vlnová délka emitovaného záření zahrnuje vlnový rozsah $\lambda = 800 \dots 2400 \text{ nm}$ s maximem intenzity na vlnové délce $\lambda = 1200 \text{ nm}$. Chemoluminiscence je fotoelektricky převedena na měřený elektrický signál.

NO_x -analyzátor SESAM

Princip činnosti: infračervený paprsek prochází zkoumaným plynem (směsí plynů) a dopadá na kapalným dusíkem chlazený Hg-Cd-Th-detektor. Tento paprsek interferuje s paprskem koherentním a pomocí FFT je identifikována



Obrázek 1.5: Optický princip FTIR spektrometru v analyzátoru SESAM [6]

ta vlnová délka, která byla pohlcena. Z toho lze jak kvalitativně tak kvantitativně charakterizovat daný plyn (t.j. určit jak jeho druh tak i koncentraci plynu).

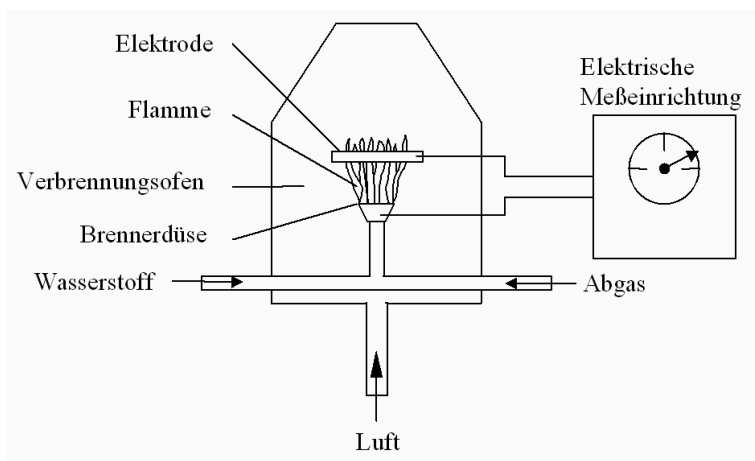
Názorný diagram principu analyzátoru po optické stránce představuje obr. 1.5 (p. 26).

1.2.3 Další měřicí zařízení

FID analyzátor nespálených uhlovodíků

Plamenový ionizační detektor FID měří souhrnou koncentraci uhlovodíků ve výfukových plynech. Plyny jsou přiváděny ohříváním vedením, čímž je zabráněno kondenzování uhlovodíků a ovlivňování tak měřených hodnot. Analyzovaný plyn je před spalovací tryskou smíchán se spalovacím plynem (směs H-He). K spalování ve formě difúzního plamene je třeba přívod vzduchu, který je realizován separátním přívodem a tento vzduch je prostý jakýchkoliv uhlovodíků. Spalování probíhá mezi elektrodami, většinou je anodou přímo spalovací tryska a katoda je kruhová kolem plamene. Napětí mezi anodou a katodou usměrňuje chod částic ionizovaných v plameni tak, že mezi elektrodami je měřitelný proud. Měřený proud je úměrný počtu atomů uhlíku spalovaných v měřeném plynu. Přístroje FID je nutné kalibrovat měřením na referenčním plynu.

Schéma principu analyzátoru nespálených uhlovodíků FID na obr. 1.6 (p. 27).



Obrázek 1.6: Princip FID analyzátoru nespálených uhvodíků [2]

Kapitola 2

Struktura měřící techniky

2.1 Motorové zkušební stanoviště

Ačkoliv pro část této práce byly rovněž využity i údaje z motorových zkoušek příslušného motoru, jejich plánování ani provádění nebyla součástí této diplomové práce. Tyto zkoušky se provádějí podle obvyklých metodik a v koncernu VW platných zkušebních předpisů. Detailnější popis těchto zkoušek přesahuje rámec této práce.

2.2 Vozidlové válcové zkušební stanoviště

Aby bylo možno určit množství emitovaných škodlivin z příslušného vozidla, musí být toto vozidlo testováno na měřicím stanovišti za takových podmínek, které co možná nejpřesněji simulují praktický jízdní provoz. To se provádí na vozidlovém válcovém zkušebním stanovišti, s předepsaným jízdním cyklem a okamžikem řazení rychlostních stupňů.

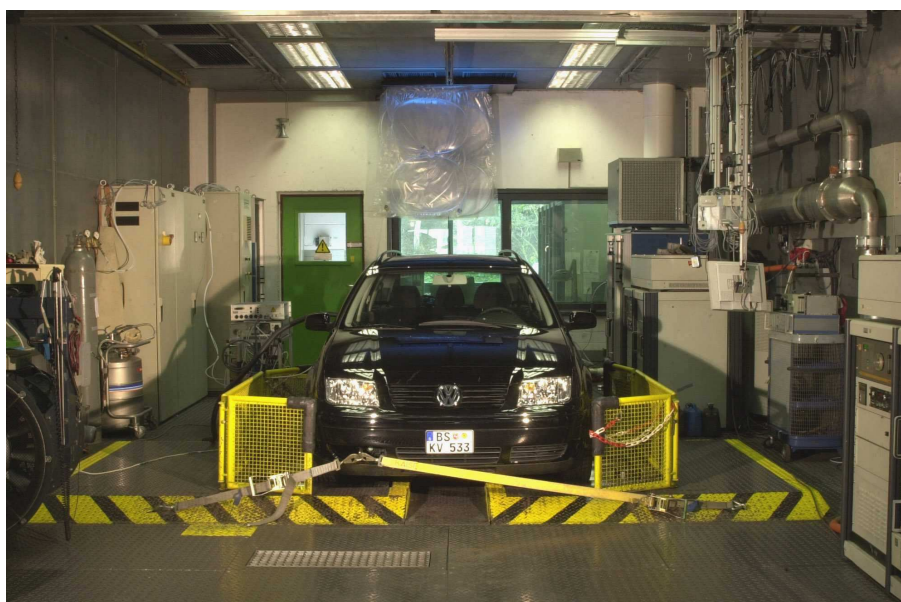
Tento způsob testu má oproti jízdnímu testu ve skutečném provozu tu výhodu, že lze velice přesně dodržet časový harmonogram v průběhu testu, aniž by bylo nutno brát ohled na plynulost skutečného provozu, a tím zajistit reprodukovatelnost a vzájemnou srovnatelnost jednotlivých testů. To vyžaduje také kontrolované zkušební podmínky jako je vlhkost vzduchu, okolní teplota a atmosférický tlak.

Testované vozidlo je postaveno svými hnanými koly na otočné válce, které simulují třecí, jízdní i vzduchové odpory skutečně jedoucího vozidla a rovněž i vliv setrvačných hmot příslušného vozidla. Vhodné rychlostní a zátěžové charakteristiky jsou řízeny příslušným programem, který ovládá dynamometrii (podle principu buď s vířivými proudy, stejnosměrným dynamem nebo hydraulické). Nutné chlazení pro systémy vozidla zajišťuje v malé vzdálenosti od vozidla umístěný ventilátor a systém ventilace zkušební buňky.

2.2. Vozidlové válcové zkušební stanoviště

měřicí hala	rozměry	12 m × 6 m × 3 m
testovací podmínky	konstantní teplota	22 °C ± 2 °C
	rel. vlhkost vzduchu	50 % ± 5 %
zkušební stanoviště	výrobce	Consine
	výkon dynamometru	60 kW
	průměr válců	500 mm
hmoty	základní hmota	1250 lbs.
	tažná síla	1660 N
	maximální hmota	7125 lbs.
	maximální rychlost	160 km/h
příjem dat	integrální, modální	
jízdní robot/cyklus		US-72, US-75, HDC, ECE 15/05, DIN 70 030, MVEG_A

Tabulka 2.1: Technická data použitého vozidlového zkušebního stanoviště [2]



Obrázek 2.1: Vozidlové zkušební stanoviště před testem se zkoušeným vozidlem [2]

Vzniklé výfukové plyny jsou shromažďovány a po testu analyzovány.

Konkrétní parametry měřicího stanoviště jsou v tabulce 2.1 (p. 29) a ilustrační záběr celého stanoviště i s testovaným vozidlem na obrázku 2.1 (p. 29).

2.3 Metody zpracování emisí z jízdního cyklu

2.3.1 Metoda CVS

Způsob měření CVS je v principu celosvětově jednotná metoda sběru výfukových plynů, která pracuje na principu zředění. Zkoušené vozidlo vypouští emise, které jsou ředěny s okolním vzduchem v poměru 1:10 a speciálními dmychadly odsávány tak, že objemový průtok směsi emisí a ředícího vzduchu je konstantní. Přimíchávání vzduchu se řídí podle okamžitého průtoku výfukových plynů a ze zředěných zplodin se během celé doby testu odebírá určitá část, která se ukládá do sběrných pytlů.

Výhody metody: Eliminuje se kondenzace vodních par ve výfukových plynech a tím ztráty oxidů dusíku v pytlích. Výrazně se sníží riziko vzájemných reakcí jednotlivých složek výfukových plynů.

Nevýhody metody: Vzhledem ke snížení koncentrací škodlivin v poměru středního zředění je nutné používat vysoce citlivé analytické přístroje.

2.3.2 Další sběrné způsoby

I v případě, že se výfukové plyny analyzují okamžitě během testu, je třeba s nimi nakládat velmi obezřetně, aby nedocházelo k systematickému ovlivňování výsledků analýz. Hlavní problém při tom tvoří poměrně vysoká teplota, se kterou opouští výfukový systém vozidla a s tím spojené zvýšené nároky na řešení takových vedení. Skrytou nevýhodou je riziko kondenzace některých složek (zejména nespálených uhlovodíků), které si přímo vynucuje další opatření (hadice přivádějící část výfukových plynů z výfukového potrubí k příslušnému analyzátoru musejí být vyhřívány).

řada/označení motoru	113/AQY
typ	4-válcový řadový motor
zdvihový objem	1984 cm ³
vrtání	82.5 mm
zdvih	92.8 mm
kompresní poměr	10.5 : 1
jmenovitý výkon	85 kW při 5200 min ⁻¹
točivý moment	170 Nm při 2400 min ⁻¹
řízení motoru	BOSCH Motronic ME 7.5
palivo	CAL Phase2 (Super, VOČ: 95)
emisní norma	ULEV/SULEV

Tabulka 2.2: Technické parametry použitého motoru AQY [12]

řada/označení motoru	113/AEG
typ	4-válcový řadový motor
zdvihový objem	1984 cm ³
vrtání	82.5 mm
zdvih	92.8 mm
kompresní poměr	10 : 1
jmenovitý výkon	85 kW při 5200 min ⁻¹
točivý moment	165 Nm při 2600 min ⁻¹
řízení motoru	BOSCH Motronic ME 7.5
palivo	Normal, VOČ: 91
emisní norma	ULEV/SULEV

Tabulka 2.3: Technické parametry použitého motoru AEG [3]

Kapitola 3

Realizace jízdních testů

3.1 Vozidlo a motor

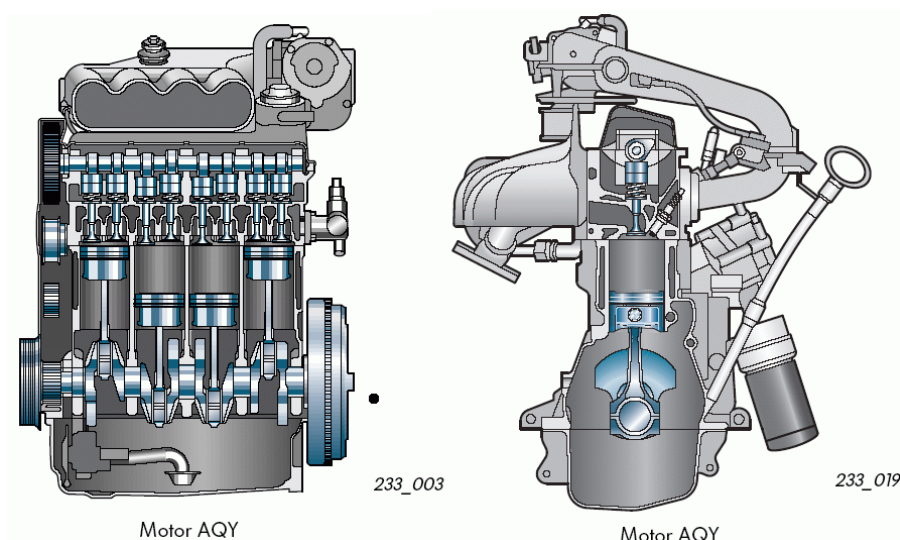
Zkušebním vozidlem byl VW Jetta Variant model 2001 v provedení pro trh USA, osazený zážehovým motorem 113/AQY. Technická data motoru v. tabulku 2.2 (p. 31). Tento vůz byl vybaven elektronickým řídicím systémem BOSCH Motronic ME 7.5, který obsahuje mj. i nepřímou metodu diagnostiky stavu katalyzátoru (DKATSP), která je podrobněji popsána v části 4.2, p. 40. Vozidlo bylo přestavěno na splnění emisní kategorie SULEV.

Pouze malá část použitých výsledků byla převzata z měření a jízdních testů prováděných na vozidle VW Golf IV s velmi podobným motorem, označeným však jako 113/AEG, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 2.3 (p. 31).

3.2 Elektronická řídicí jednotka motoru

Funkční schéma elektronické řídicí jednotky je na obr. 3.2, p. 34. BOSCH Motronic ME 7.5 je integrovaný systém řízení vstřikování paliva a zapalování. Oba podsystémy spolu úzce kooperují, čímž je umožněno využití signálů z jednotlivých senzorů systému společně. V řídicí jednotce jsou uloženy všechny charakteristické hodnoty a parametry pro provoz motoru za různých provozních okolností. Skutečně naměřené hodnoty ze snímačů jsou pak s těmi uloženými porovnávány. Tak je vyhodnocen okamžitý provozní stav motoru a v závislosti na tomto vyhodnocení jsou nastaveny příslušné faktory (např. vstřikovací ventily a zapalovací hodnoty). Kromě toho může tato jednotka zajišťovat i další funkce (např. omezení otáček či výkonu).

Z hlediska diagnostiky stavu katalyzátoru je podstatné, že řídicí jednotka má v sobě též integrovanou analýzu stavu katalyzátoru a to různého typu v závislosti na emisní kategorii, kterou musí vozidlo splňovat. V sériovém



Obrázek 3.1: Schéma použitého motoru [12]

provedení vozidla použitého pro testy byla integrována aktivní analýza označovaná jako *DKASTP*. Podrobněji jsou všechny tyto metody popsány v kapitole 4, p. 40.

3.3 Měřicí aparatura

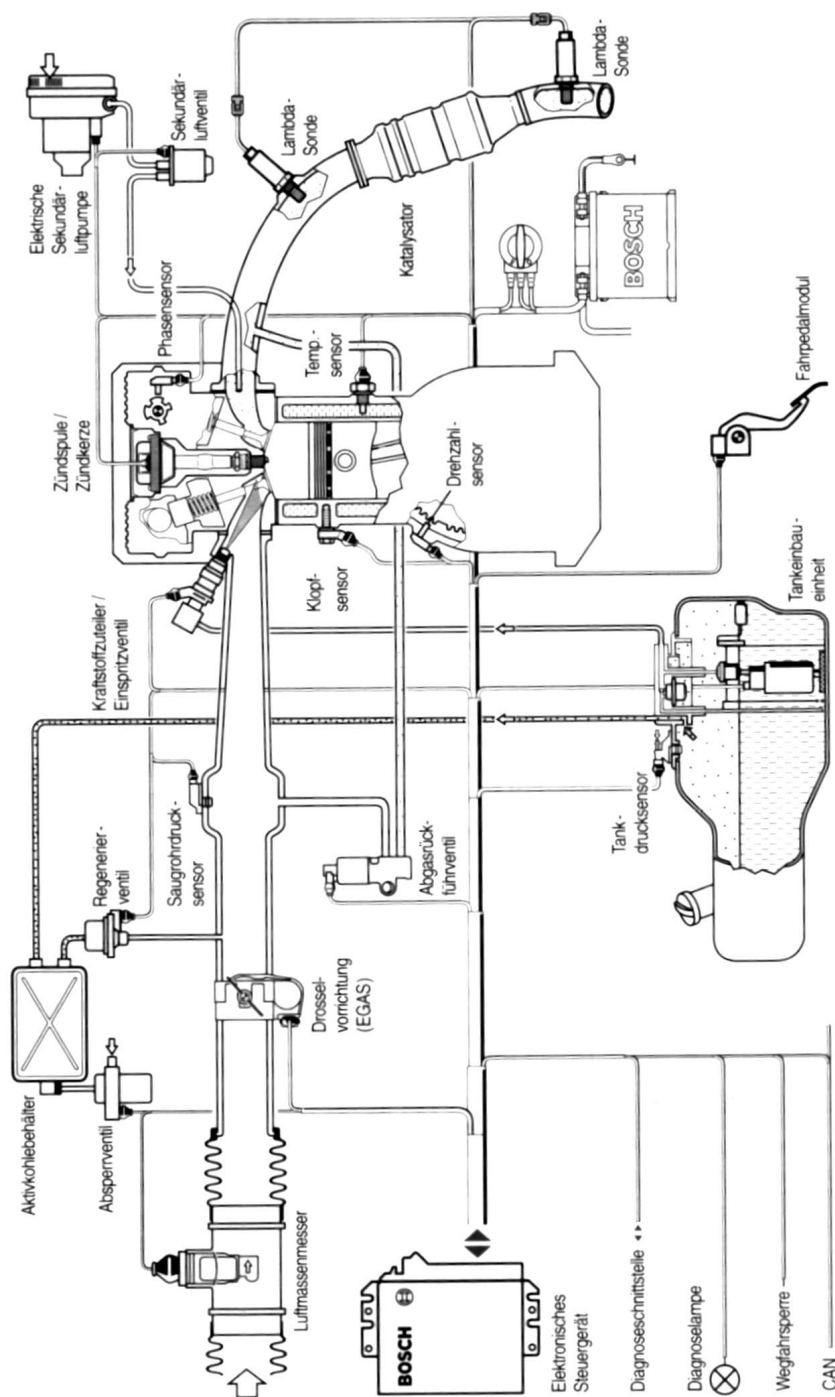
Měřicí aparatura sestávala především z následujících zařízení, která byla umístěna ve voze:

- platforma ES 1000.2
- emulátor ETK
- FID-analyzátor
- zesilovače signálu teploměru
- pomocné jednotky a zařízení

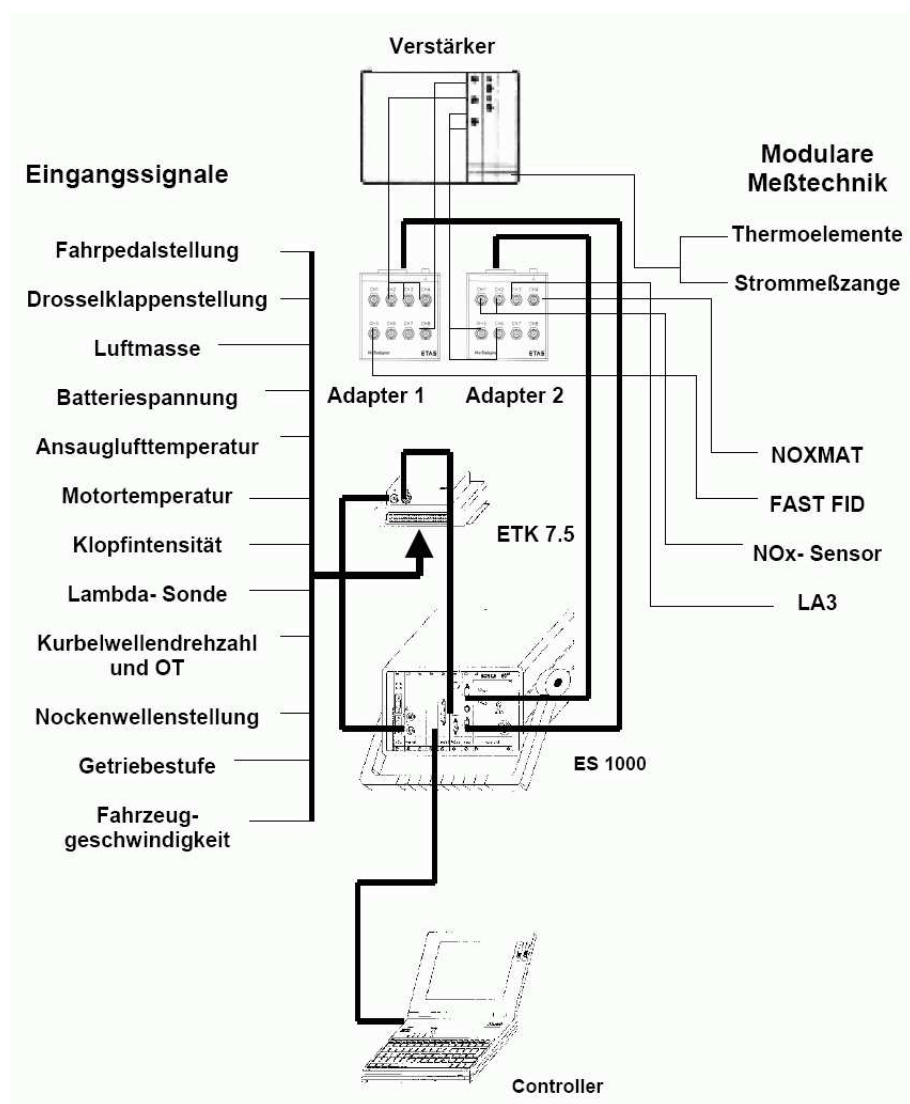
Mimo vozidlo pak byly umístěny především tyto přístroje:

- NO_x-MAT
- zařízení pro CVS
- analyzátor SESAM

Záběry z reálného zapojení měřicí techniky během testu a jejího uspořádání ve vozidle přibližují obr. 3.4 (p. 36), obr. 3.4 (p. 36) a obr. 3.4 (p. 36).



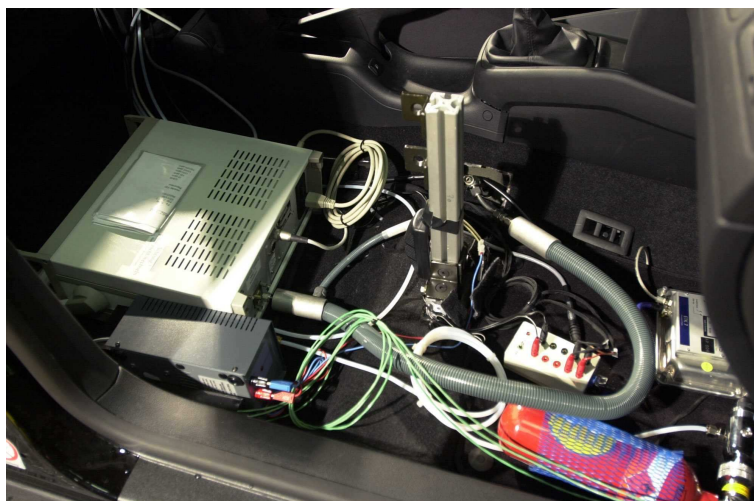
Obrázek 3.2: Funkční schéma elektronické řídicí jednotky motoru [3]



Obrázek 3.3: Schéma architektury měřicí aparatury [3]



Obrázek 3.4: Uspořádání měřicí aparatury v zavazadlovém prostoru: napájecí akumulátor, nabíječ akumulátoru, ES 1000.2, zesilovač signálů z teploměrů, A/D-převodník, ukazatel λ , spínač nabíjení baterie, hlavní spínač pro okruhy v zavazadlovém prostoru [2].



Obrázek 3.5: Uspořádání měřicí aparatury v kabině (nožním prostoru spolujezdce): odběr výfukových plynů pro NO_x -MAT, FID-analyzátor, elektronická řídicí jednotka motoru a modul ETK, odběr výfukových plynů pro FID, topení pro vyhřívanou hadici FID, H-He směs pro FID, hlavní spínač pro okruhy v kabině [2].



Obrázek 3.6: Uspořádání měřicí aparatury vně vozidla: vyhřívaná hadice pro NO_x-MAT, NO_x-MAT, dmychadla pro syntetický vzduch, hadice se syntetickým vzduchem z tlakové láhve [2].

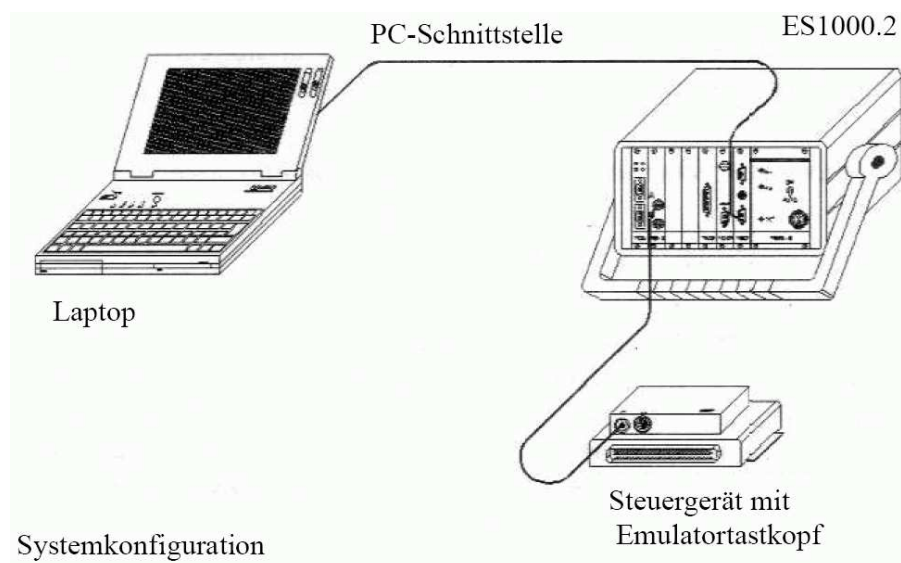
3.3.1 ASCET

Jako systém pro návrh funkcí a měření byl použit ASCET firmy ETAS. ASCET je integrované vývojové prostředí pro nelineární systémy. Vývoj nových funkcí řídicí jednotky se provádí a optimalizuje právě v prostředí ASCET a s pomocí ES 1000.2 (univerzálně použitelná vývojová a experimentální platforma) aplikuje. U našeho testovacího vozidla byl ES 1000.2 prostřednictvím příslušného rozhraní připojen na ETK, což je modul obsahující vlastní paměť SRAM a který je již přímo (pomocí mikrosběrnice) propojen s řídicí jednotkou motoru. Názornou představu o uspořádání poskytuje obr. 3.7 (p. 38) a celkovou situaci obr. 3.3 (p. 35).

Do paměti tohoto modulu lze přistupovat dvěma způsoby: počítač řídicí jednotky může zpracovávat programové instrukce a číst parametry (charakteristiky), zatímco aplikační systém může během provozu tyto údaje měnit. To znamená, že ze strany řídicí jednotky je paměť emulátoru chráněna proti zápisu. Jiná část této paměti však slouží k zápisu údajů z řídicí jednotky a tyto údaje může aplikační systém číst a zpracovávat. Kromě paměti SRAM je v emulačním modulu rovněž paměť FLASH pro trvalé uložení programu a dat.

Připojení k PC je realizováno pomocí PC-Card (PCMCIA) a modulu ES 1120.1, který zajišťuje především prostorové oddělení jednotky ES 1000.2 a PC.

Během testu na systému ES 1000.2 běží SW, který byl programován podle poznatků z předchozích měření. V jádře jde o algoritmus k vyhodnocování



Obrázek 3.7: Schéma zapojení jednotky ASCET [17]

katalyzátoru a ze vstupních dat je schopen počítat například hodnotící kritérium KZK nebo identifikovat ty fáze testu, při nichž vozidlo zrychluje.

3.4 Použité katalyzátory

Pro účely provádění emisních jízdních testů s cílem nalezení vhodné alternativní metody ke zjišťování stáří katalyzátorů bylo nutno nejprve vyvinout takové postupy, kterými lze v poměrně krátké době a s relativně nízkými náklady vytvořit katalyzátory, jejichž parametry odpovídají katalyzátorům definovaného stáří a stupně poškození. Tato problematika byla rovněž řešena v rámci diplomových a doktorandských prací v oddělení K-EFVT (popř. K-EFAE) firmy Volkswagen AG ve Wolfsburgu. Má práce v tomto směru využívala především výsledků dvou z nich: [1] a [3]. Podrobný přehled použitých katalyzátorů, na kterých byly prováděny jízdní testy, předkládá tabulka 3.1, p. 39.

Číslo katalyzátoru	Předřadný katalyzátor	Hlavní katalyzátor	Počet měřených testů
20	nový, 200 g/cft, délka 2.94"	nový, 100 g/cft, délka 2.94"	15
21	nový, 100 g/cft, délka 2.94"	nový, 100 g/cft, délka 2.94"	9
30	hořák 5 h/1180 °C, 100 g/cft, délka 2.94"	nový, 100 g/cft, délka 2.94"	10
32	pec 4 h/1000 °C, 200 g/cft, délka 2.94"	nový, 100 g/cft, délka 2.94"	10
31	hořák 5 h/1180 °C, 200 g/cft, délka 2.94"	hořák 5 h/1180 °C, 100 g/cft, délka 2.94"	23
33	nový, povrstveno jen 2/3 délky vzadu	nový, 100 g/cft, délka 2.94"	10
34	nový, 200 g/cft, délka 2.94"	pec 4 h/1150 °C, 100 g/cft, délka 2.94"	23
8	pec 4 h/980 °C, 200 g/cft, délka 2.94"	pec 4 h/1150 °C, 100 g/cft, délka 4.5"	11

Tabulka 3.1: Parametry v testech použitých katalyzátorů včetně stupně jejich poškození [12]

Kapitola 4

Metody monitorování stavu katalyzátoru

4.1 Amplitudová analýza se dvěma λ -sondami

Jde o pasívní diagnózu založenou na porovnávání amplitud λ -sondy před a za katalyzátorem při přechodech motoru z jednoho režimu do jiného. Tato metoda je ovšem počínaje kategorií ULEV nepoužitelná, neboť není schopná reagovat na tak malé změny, které tato kategorie (a kategorie následující) vyžadují. [2]

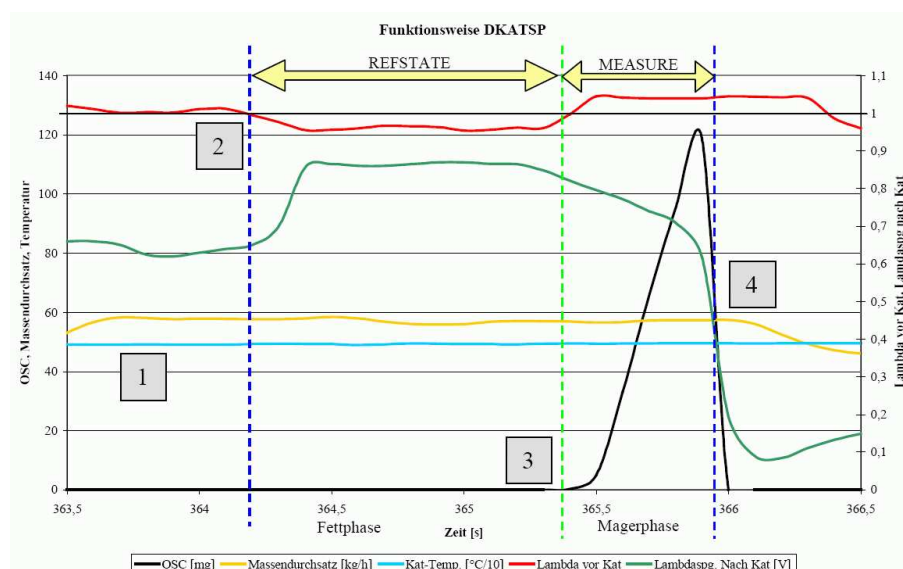
4.2 DKATSP

Jde o aktivní diagnostiku katalyzátoru na principu skokové změny signálu λ -sondy, kdy tento aktivní diagnostický systém využívající *paměťového kyslíkového* jevu **OSC** cíleně ovlivňuje některé pracovní stavy motoru, aby mohl provádět potřebná měření. Tak byla vyvinuta diagnostika DKATSP, postavená na nepřímém měření OSC při přechodu režimu bohaté směsi na směs chudou.

Její podstatou jsou opět dvě λ -sondy: jedna λ -sonda LSU před katalyzátorem, která přesně určuje součinitel λ použité směsi a druhá λ -sonda LSF určuje koncentraci kyslíku. Toto měření probíhá při stacionárním pracovním bodě motoru při pouze částečném zatížení, protože jedno z kritérií je pouze určité množství (průtok) výfukových plynů. Představu o činnosti této analýzy poskytuje obr. 4.1, p. 41.

Příslušný diagnostický modul řídicí jednotky se dále rozděluje na tyto bloky: INCOND, EQUILAM, REFSTATE, MEASURE, COUNTER, CATERR, LAMCON a ZA.

- INCOND obsahuje vstupní podmínky (množství vzduchu, teplota výfukových plynů) a podmínky pro přerušení analýzy (chybové stavy)



Obrázek 4.1: Diagram činnosti analýzy DKATSP [2]

- EQUILAM zajišťuje, aby se hodnota λ nacházela v předepsaných mezích, které jsou nutné pro úspěšný průběh analýzy
- REFSTATE zajišťuje vytvoření stavu pro referenční měření OSC (katalyzátor je zbaven kyslíku)
- MEASURE stanovuje vlastní hodnotu OSC a provádí filtrování
- COUNTER počítadlo počtu provedených zkoušek, které musí být nezávislé na výsledku měření a které se automaticky vynuluje, je-li dosažen příslušný počet událostí
- CATERR zaznamenává způsob a počet opakovaných zkoušek, počet výskytů chyb a počet doplňkových zkoušek
- LAMCON obsahuje parametry λ -sondy (stupeň obohacení směsi pro vytvoření referenčního stavu a souřadnice λ -sondy)
- ZA řídí sled funkcí jednotlivých bloků

Tato metoda diagnostiky katalyzátoru je sériově použitá metoda ve vozidlech pro trh USA ke splnění požadavků OBD II. Proto byla použita i ve testovacím vozidle aby mohla být porovnávána s ověřovanou metodou KZK a dalšími.

Podrobnější údaje lze dohledat ve firemní literatuře [19].

4.3 Integrální kritérium KZK

Emise NO_x vznikají převážně během akceleračních fází jízdních testů, při kterých je motor vystaven vysoké zátěži a výfukové plyny mají vysoké teploty. Při splnění následujících předpokladů lze využít této diagnostiky stavu katalyzátoru:

- poměr mezi kumulovanými množstvími oxidů dusíku za katalyzátorem a energie vydané v identickém časovém období během akcelerační fáze daného jízdního cyklu je konstantní a závislý pouze na konverzní schopnosti katalyzátoru.
- tvorba zápalné směsi je udržována dostatečně přesně v λ -okně

Dělí-li se kumulovaná množství oxidů dusíku kumulovaným výkonem, obdrží se charakteristická hodnota (KZK), která je téměř nezávislá na zvoleném jízdním cyklu. Matematický algoritmus dále předpokládá, že hodnoty pro každou jednotlivou akcelerační fázi budou počítány samostatně, čímž se umožní přenos těchto hodnot na normální jízdní podmínky. Při zhoršené konverzní schopnosti katalyzátoru se současně zvýší hladiny emitovaných koncentrací oxidů dusíku za katalyzátorem a tím rovněž hodnota KZK. Překročí-li pak tato hodnota jistou mez, bude aktivována varovná funkce systému OBD. Toto tedy předpokládá, aby v paměti řídicí jednotky byla uložena mezní charakteristika katalyzátoru.

Hodnoty kumulovaných množství oxidů dusíku se pro účely této diagnostiky odebírají z výsledků měření poskytovaných NO_x -sensorem, který je kalibrován na ppm. S přihlédnutím ke známé molární hmotnosti NO_x a jako konstantě chápané molární hmotnosti výfukových plynů lze kumulovaná množství NO_x vypočítat.

Okamžitý výkon motoru není měřen, ale početně určen z množství paliva injektovaného do motoru na základě informací poskytnutých řídicí jednotkou motoru a porovnáním s příslušnou charakteristikou (změřenou na skutečném motoru) uloženou v paměti jednotky.

Kapitola 5

Zpracování naměřených výsledků

5.1 Prvotní zpracování dat

Primární zpracování naměřených dat probíhalo po absolvování každého jízdního testu ve třech fázích, které jsou popsány dále, s cílem zajistit jednotnost a přehlednost dat pro jejich další a pozdější zpracování.

5.1.1 Načtení dat

Data naměřená během testu nebyla vzhledem ke složitosti a různorodosti jednotlivých přístrojů shromažďována centrálně, nýbrž odděleně (v. obr. 3.3, p. 35). Tento proces tedy znamenal načtení výsledků měření z jednotlivých částí aparatury do počítače (resp. počítačů) a jejich řádné označení dle zavedeného schématu. Součástí tohoto načtení bylo i převedení údajů na jednotný formát záznamu dat, neboť nativní formáty jednotlivých komponent se od sebe lišily, vzhledem k proprietárním firemním standardům různých výrobců. Data v tomto jednotném formátu pak mohla být načtena systémem MATLAB® jako běžný datový soubor a uložena ve formátu *.MAT v.5 pro další zpracování.

5.1.2 Interpolace a vzorkování

Tento proces probíhal již výhradně v prostředí MATLAB® a jeho cílem bylo zajistit stejnou úroveň rozlišení pro všechny měřené veličiny. Například měření koncentrací oxidu dusíku pomocí přístroje NO_x-MAT probíhá se vzorkovací frekvencí 100 Hz, zatímco poněkud přesnější přístroj SESAM pro totéž měření užívá vzorkovací frekvenci 1 Hz. Z tohoto příkladu je zřejmé, že

některé naměřené veličiny bylo nutno interpolovat na vyšší rozlišení, zatímco jiné převzorkovat na frekvenci nižší, aby výsledkem byly vektory s jednotnou vzorkovací frekvencí 10 Hz.

5.1.3 Harmonizace a uložení

Harmonizací se rozumí téměř finální úprava vektoru naměřených veličin, aby neobsahovaly nežádoucí data před počátkem měření a po jeho konci, která však musela být z různých důvodů naměřena, ale do dalšího zpracování nevstupují. Jde zejména o doby před spuštěním testu, kdy některé snímače již řádně snímají a zaznamenávají měřené veličiny, zatímco jiné se teprve kalibrují nebo aktivují. Harmonizace byla posledním krokem před uložením jednotlivých vektorů do definované hierarchie v strukturované proměnné (*structure*) v podobě buňkové matice (*cell array*). Tato proměnná byla nazvaná *stati* a měla strukturu uvedenou v 5.1, p. 45.

5.2 Druhotné zpracování dat

Ačkoliv nemalá část numerických analýz a výpočtů byla prováděna na základě vektorů uložených v proměnné *stati* a jejich výsledky vedly k potvrzení či vyvrácení mnoha hypotéz souvisejících s možnostmi diagnostiky stavu katalyzátoru, z některých výsledků bylo zřejmé, že jsou zatíženy poměrně nemalou chybou a mají jen nepatrnou (nebo vůbec žádnou) vypovídací hodnotu [2]. Toto byl například problém při vyšetřování spolehlivosti kritéria KZK, které téměř bez potíží hodnotilo stav katalyzátoru během testu FTP, ale již mnohem méně spolehlivě se chovalo při testech MVEG nebo HDC.

Z podrobného srovnání průběhů měřených veličin se ukázalo zřejmým, že některé veličiny jsou časově zpožděné vzhledem k jiným. Lze důvodně předpokládat, že tato *dopravní* zpoždění mají jak ryze mechanické příčiny (různé ale nenulové délky přívodních potrubí, nekonstantní ale konečné rychlosti proudění plynu ve výfukových potrubích), tak i elektrické příčiny (signály jsou vedeny různými signálovými cestami a různě rychle zpracovány). Tuto situaci ilustruje obrázek 5.1 (p.49). Bylo tedy použito dvou metod k odstranění vlivu těchto zpoždění.

5.2.1 Regresní (automatická) synchronizace

Tento úkol zajišťovala rutina pojmenovaná *regsync*. Jde opět o parametricky volanou funkci (v různých modifikacích). Vstupními údaji jsou alespoň dva porovnávané vektory (téže naměřené veličiny), u kterých se předpokládá, že jsou si svými průběhy blízce podobné. Stěžejním bodem algoritmizace této úlohy, bylo porovnávání koeficientu lineární regrese závislosti obou těchto

```
-stati
--KAT_8
  ---d011002:      +FTP
  ---d010920:      +MVEG_US_B      +MVEG_US
  ---d011024:      +HDC      +MVEG_US      +MVEG_US_B
--KAT_20
  ---d010704:      +FTP
  ---d010705:      +FTP
--KAT_31
  ---d011009:      +MVEG_US_B
  ---d011010:      +FTP
  ---d011011:      +MVEG_US_B
  ---d011015:      +FTP
  ---d011016:      +FTP
--KAT_33
  ---d010709:      +FTP
  ---d010710:      +FTP
  ---d010711:      +HDC      +MVEG_US
  ---d010712:      +MVEG_US_B
  ---d010717:      +FTP      +MVEG_US
--KAT_34
  ---d010905:      +HDC      +MVEG_US      +MVEG_US_B
  ---d010910:      +MVEG_US_B      +HDC
  ---d010911:      +FTP

- [FTP | HDC | MVEG_US | MVEG_US_B]
--KZK4
--LA3vK
--NOxSensNOxppm
--DIAG
--ausblenden
--ti2_w
--nmot
--VALIDCNT
--vfzg
--NOx_CLD
--NOx_sesam
```

Tabulka 5.1: Přehled složek strukturované proměnné *stati*

zmíněných vektorů, kdy jeden vstupoval jako datový vektor X a druhý jako datový vektor Y . V ideálním případě, kdy by oba vektory byly ve všech bodech (tedy v každém měřeném okamžiku), identické, bychom získali

přímkovou závislost procházející středem souřadného systému, protínající kvadranty I a III a s osou x (resp. y) svírající úhel přesně $\pi/4 (= 45^\circ)$. Takováto závislost má potom korelační koeficient $r = 1$. Budeme-li nyní postupně vzájemně posouvat (synchronizovat resp. desynchronizovat) tyto dva studované vektory, v každé poloze vypočítávat vzájemný korelační koeficient a tento spolu s údajem o příslušném posunutí zapisovat do nějaké pomocné proměnné, lze v ní poté pouze snadno vyhledat maximální hodnotu korelačního koeficientu a k ní příslušnou hodnotu posunutí. Tyto dvě hodnoty a případně i oba datové vektory v synchronizovaném stavu¹ jsou možnými výstupy rutiny `regsync`. Jádro algoritmu této rutiny je v části 5.2 (p. 47).

Během vývoje této rutiny byl však zjištěn jeden problém, jehož příčiny se nepodařilo blíže specifikovat. V některých případech této automatické synchronizace totiž jako optimální vzájemný posun (tedy stav, při kterém korelační koeficient nabýval maximální hodnoty z celé zkoumané množiny) vycházel takový, který z empirického pohledu nemohl být správný (posunutí dosahovalo např. až téměř 50% délky vektoru). Z tohoto důvodu je v rutině pevně vestavěno omezení maximálního hledaného posunutí na $\pm 10\%$ délky vektoru.

5.2.2 Synchronizace s nekonstantním časovým posunem

Jeden z pokusů jak odstranit ne zcela konstantní časové posuny mezi dvěma vektory bylo sestavení rutiny pojmenované `t_dmodul`. Jejím cílem bylo pokusit se zpětně odstranit vlivy dopravních zpoždění signálů, způsobených především mnohdy nemalými délkami propojovacích vedení k jednotlivým analyzátorům. To se uskutečňovalo na celkem jednoduché úvaze o změnách rychlostí proudících plynů v souvislosti se změnami pracovních režimů motoru. Bohužel, tento postup sice vedl k výpočtu takových nekonstantních zpoždění, která byla zcela realistická a pravděpodobná², ale při pokusech o aplikaci na dotčené zpožděné vektory, vždy vedl ke zcela vadným a zkresleným výsledkům. Více tato problematika již tedy nebyla řešena.

¹Neopomenutelným omezením celé této procedury, resp. jejích výsledků je skutečnost, že výsledné synchronizované vektory musí být zkráceny o tu část nerelevantních dat, která odpovídá vzájemnému posunu. To vše proto, aby výsledné vektory měly opět schodnou délku. Jiným možným opatřením mohlo být doplnění příslušných chybějících částí vektoru např. nulou nebo proměnnou `NaN` (*=Not a Number*). V případě doplňování nuly by však mohlo dojít k nežádoucímu zkreslení některých dalších vyhodnocování, zatímco při užití symbolu `NaN` nastávají některé numerické obtíže při dalších matematických úkonech, plynoucí z charakteru této proměnné.

²Jejich exaktní experimentální ověření však nebylo možno vzhledem k již tak značné komplikovanosti celého měřicího procesu provést a pravděpodobně by to vyžadovalo poměrně výrazné zásahy do ověřených a používaných metod i přístrojů.

```
% setting parameters
la=length(a);
limla=fix(.1*la); % comparing to 10% length forwards and backwards

% first half-run: a-moved (to left) and b-fixed
c=[];
% if loop index smaller then length limit
for l=1:limla,
    % computing and storing correlation coefficients
    cc=corrcoef([a(1:la)' b(01:(la-l+01))']);
    c=[c cc(1,2)];
end
% cutting first pair (it'd be twice)
c=c(2:end);
lc=length(c);

% second half-run: a-fixed and b-moved (to left)
d=[];
% if loop index smaller then length limit
for l=1:limla,
    % computing and storing correlation coefficients
    cc=corrcoef([b(1:la)' a(01:(la-l+01))']);
    d=[d cc(1,2)];
end
```

Tabulka 5.2: Jádro algoritmu rutiny `regsync`

5.2.3 Manuální synchronizace

Během práce s rutinou `regsync` se ukázalo, že zdaleka ne všechna zpoždění jsou zcela konstantní a homogenní v celé délce vektoru. Protože vestavěné funkce MATLAB® v žádném případě neumožňovaly pohodlné ovládání při studiu průběhu měřených veličin, bylo rozhodnuto vytvořit (i pro jiné účely použitelný) program, který by umožňoval poměrně snadné manipulování s několika křivkami, jejich zobrazování a porovnávání. Tento program byl nazván `mansync`. Jedná se vlastně o funkci, volanou přímo z příkazové řádky prostředí s různými parametry (nejčastěji s daty jednotlivých zkoumaných křivek). Tato funkce pak umožňuje relativně rychle a přehledně manipulovat až s osmi závislostmi, provádět jejich vzájemné posuny, výřezy a libovolná zvětšení/zmenšení a to nejen kvalitativně, ale rovněž i kvantitativně. Celá tato funkce běží výhradně v GUI-módu MATLAB®u a je plně graficky (a tedy poměrně intuitivně) ovladatelná prostřednictvím kurzoru a tlačítek myši.

Grafická podoba okna mansync

Na obrázku 5.1 (p. 49) je znázorněna obvyklá podoba okna rutiny mansync. Okno obsahuje všechny obvyklé ovládací grafické prvky a to:

- **push button** pro spuštění submenu křivek, spuštění nápovědy a uzavření okna
- **radio button** pro selekci dané křivky k manipulacím a výběr směru v osách x nebo y
- **check box** pro zapnutí/vypnutí dané křivky do výsledného zobrazení a pro zapnutí/vypnutí legendy ke křivkám
- **slider** pro rychlé změny parametrů zvětšení, posunutí a faktoru synchronizace
- **edit field** pro exaktní nastavení a zobrazení parametrů zvětšení, posunutí a faktoru synchronizace

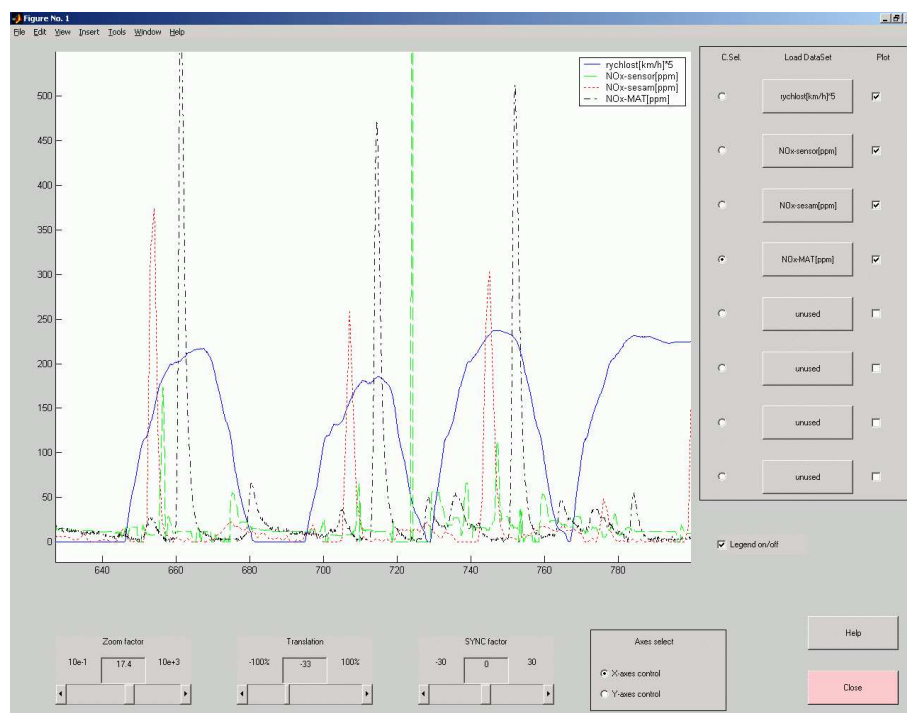
A pomocné prvky:

- **curve**
- **frame**
- **text field**
- **axes**

Všechny tyto prvky umožňují jako jeden ze svých parametrů uchování libovolných dat pod položkou **UserData**, což byl velice vhodný způsob jak přenášet aktuální údaje každého grafického prvku z jednoho průběhu funkce do druhého (v. 5.2.3, p. 49). Největší část okna zabírá z pochopitelných důvodů osový souřadný systém s plochou pro kresbu křivek. Při pravém okraji okna (v pravém horním rohu) je umístěn obdélník s ovládacími prvky všech osmi křivek. V pravém dolním rohu jsou tlačítka **Help** pro nápovědu a **Close** pro uzavření okna (a ztrátu nastavení) a zaškrtačkové pole pro zapnutí/vypnutí legendy křivek. Při dolním okraji jsou zprava: obdélník pro selekci směru v osách x nebo y , obdélník s parametry a nastaveními faktoru synchronizace, posunu a zvětšení.

Funkční struktura rutiny mansync

Celý algoritmus je primárně strukturován jako funkce volaná s různými parametry a mající primárně pouze grafický výstup. Při inicializačním volání této funkce je žádán vstup bázevého vektoru (obvykle časová pořadnice), datových vektorů a případně vektorů nebo matice obsahující popis (jména)

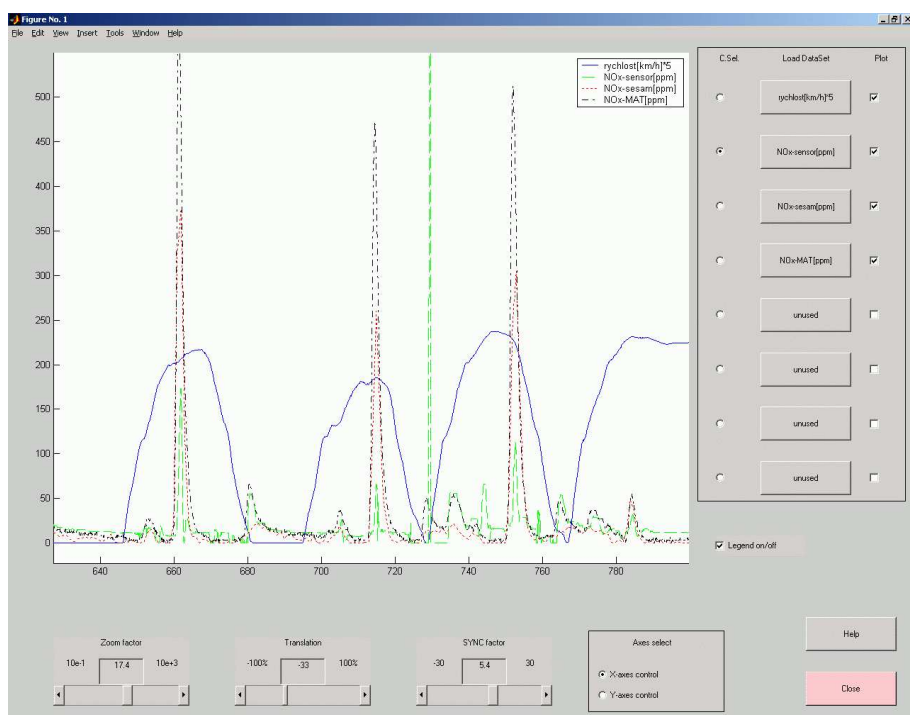


Obrázek 5.1: Ukázka grafického okna mansync se třemi závislostmi v nesynchronizované podobě

veličin. Skončením inicializační procedury je běh rutiny ukončen a řízení je vráceno zpět hlavnímu programu (příkazovému řádku). Jediným produktem je tedy vytvořené grafické okno nesoucí si všechny potřebné údaje v sobě samém (resp. ve svých proměnných). Jakýkoliv zásah uživatele na některý z ovládacích prvků vyvolá opětovné spuštění rutiny mansync, ale tentokrát s jedním konkrétním parametrem majícím charakter příkazů. Právě tato neustálá volání a ukončování běhu rutiny si vyžádala řešení vzájemného předávání dat nezávislého jak na globálních proměnných MATLAB[®]u, tak na lokálních proměnných ve **workspace**, protože by se tak výrazně omezila přehlednost celé práce v prostředí MATLAB[®]u³, ale zejména zabránilo provozu několika nezávislých oken mansync (s různými veličinami), neboť by docházelo ke kolizi dat v proměnných. Tímto způsobem (paramtrickým voláním rutiny), jsou řešeny všechny aktivity okna včetně jeho ukončení.

³provozně potřebných proměnných je ca. 50 a navíc jsou rozdílného charakteru (vektory, skaláry, matice různých rozměrů, matice znakové)

5.2. Druhotné zpracování dat



Obrázek 5.2: Ukázka grafického okna mansync se třemi závislostmi v synchronizované podobě

5.3 3D-závislosti

Zřejmou nevýhodou při práci a vyhodnocování signalů takovým způsobem jaký byl popsán v předchozích odstavcích je především jedna zcela zásadní skutečnost - nutnost mít k dispozici poměrně dlouhý datový vzorek a ten do-datečně (tedy výhradně jako celek) zpracovávat. To znemožňuje přímou diagnostiku v reálném čase, a nabízí pouze jakousi pseudo-reálnou analýzu po více či méně dlouhých a zpětně vyhodnocovaných úsecích. Vzhledem k tomu, že některá kritéria OBD (resp. EOBD) jsou i celkem striktně vázána na čas, lze se důvodně domnívat, že takováto (popř. výhradně takováto) diagnostika by ani v případě optimálních výsledků nemusela splňovat právě tato časová kritéria. Byl tedy učiněn pokus z uskutečněných měření sestavit takové charakteristiky, jež by bylo možno uložit do paměti řídicí jednotky motoru a využít je ke zrychlenému porovnání s aktuálně (a okamžitě) naměřeným signálem (zejména pokud jde o signál z NO_x – *sensoru*), popř. jako jistý etalon kontrétního stavu katalyzátoru v době jeho životnosti použitelný jako kontrolní parametr i pro jiný princip diagnózy.

Z obecného názoru je známo (a provedená měření i následné analýzy toto také potvrdily), že hodnoty emitovaných škodlivin (surových emisí, tedy emisí před katalyzátorem) jsou závislé především na dvou parametrech popisujících pracovní stav motoru, to jsou otáčky motoru n_{mot} a odváděný točivý moment M_D . Tím lze tedy sestavovat a následně podrobovat zkoumání různé 3-D závislosti⁴ na dvojici nezávislých proměnných $f(n_{mot}, M_D)$.

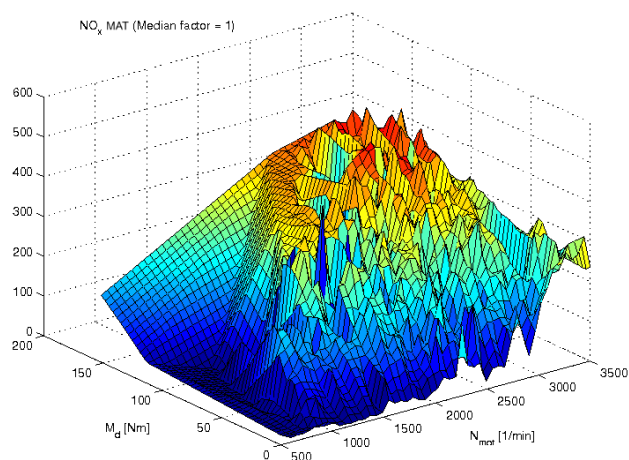
5.3.1 Regresní analýza - program AUTOREG

Tento program byl sestaven v jiném výzkumném oddělení podniku Volkswagen AG Wolfsburg k analýze různých závislostí. Jeho autorem je p.Thiele. Jde opět o poměrně složitou rutinu sestavenou pro prostředí MATLAB®. Jejím cílem je na základě komplexních množin naměřených dat konkrétního motoru najít a sestavit takovou soustavu relativně jednoduchých analytických matematických vztahů s konkrétními parametry, která by po dosazení nezávislých proměnných byla schopna vrátit takové vypočtené hodnoty, které se co nejvíce blíží těm původně naměřeným. Tímto způsobem byla sestavena a v pokusech použita charakteristika zobrazená v obr. 5.9, p. 55.

5.3.2 Interpolační matice

Na základě vlastních provedených jízdních testů a rovněž dat získaných ze statických testů na motorovém stanovišti byly sestaveny různé interpolační matice (charakteristiky motoru), se kterými lze nadále pracovat a

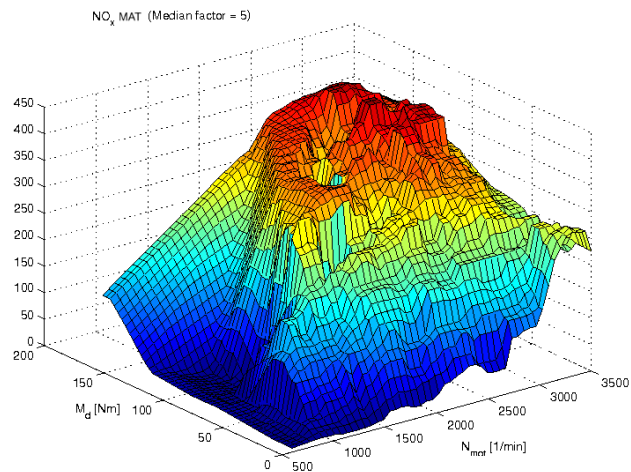
⁴tedy především emitovaná množství a koncentrace škodlivin



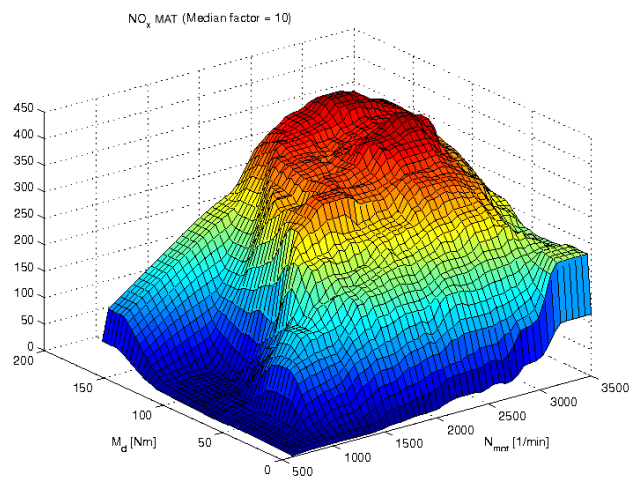
Obrázek 5.3: 3D-závislost koncentrace $\text{NO}_{x\text{CLD}}[\text{ppm}/10] = f(n_{\text{mot}}, M_D)$, po aplikaci mediánového faktoru 1, získaná z **dynamického** jízdního testu

využívat při analýzách. Zejména generování těchto matic na základě jízdních testů si vyžádalo sestavení dalších pomocných rutin, které vyhledávaly a vzájemně vyhodnocovaly ty identické provozní stavy motoru, při nichž byly naměřené veličiny podstatně rozdílné, a naopak takových rutin, které interpolovaly chybějící data pro stavy neměřené. Jde především o tyto vytvořené rutiny: F1STNAN, HISTPLOT, INTERFIT, MAP3D, NAN2ZERO, ZERO2NAN.

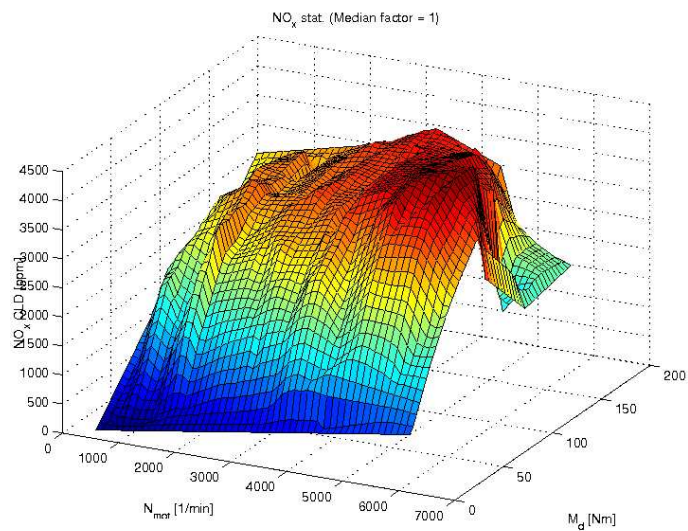
Dalším velmi důležitým mezikrokem při tvorbě těchto interpolačních matic byla aplikace tzv. *mediánového filtru*. Podobu takovéto interpolační matice před touto filtrací ukazuje obr. 5.3, p. 52. Právě v důsledku dodatečného dopočítávání některých hodnot vznikla charakteristika s poměrně výraznými lokálními extrémy, které evidentně pocházely právě z nedostatečné datové základny pro určité oblasti. Právě zvyšování faktoru aplikovaného mediánového filtru (zvětšování zohledňované oblasti), pomohlo vyhladit tyto charakteristiky do akceptovatelných mezí (cf. obr. 5.4, p. 53 a obr. 5.5, p. 53). U statických interpolačních matic není účinek tolik výrazný, ale přesto patrný (cf. obr. 5.6, p. 54, obr. 5.7, p. 54 a obr. 5.8, p. 55).



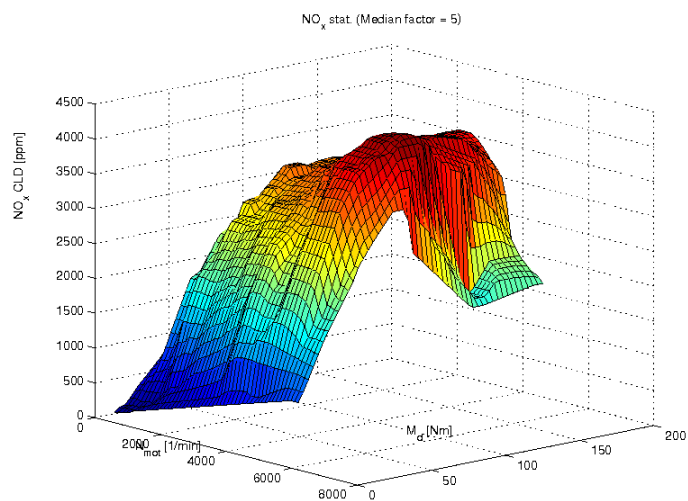
Obrázek 5.4: 3D-závislost koncentrace $NO_{xCLD}[\text{ppm}/10] = f(n_{mot}, M_D)$, po aplikaci mediánového faktoru 5, získaná z **dynamického** jízdního testu



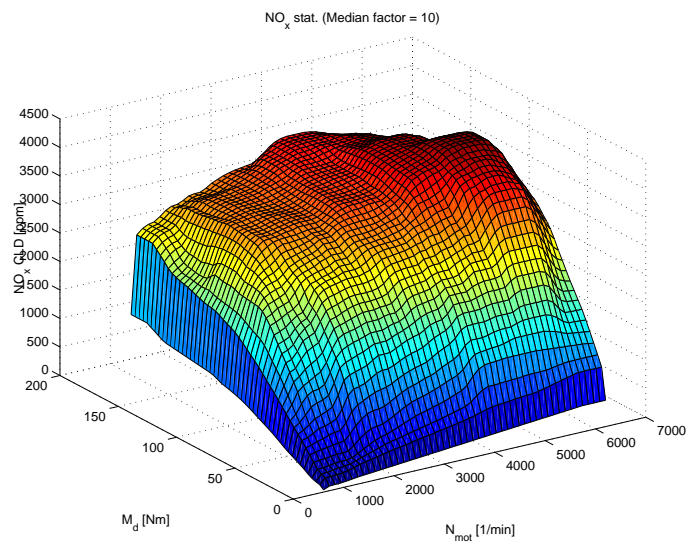
Obrázek 5.5: 3D-závislost koncentrace $NO_{xCLD}[\text{ppm}/10] = f(n_{mot}, M_D)$, po aplikaci mediánového faktoru 10, získaná z **dynamického** jízdního testu



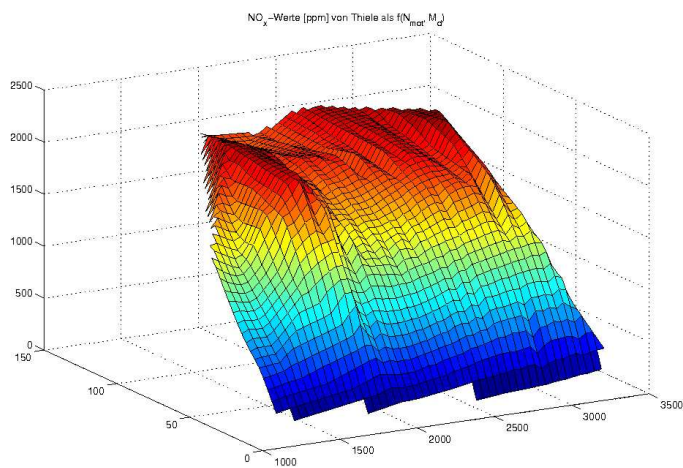
Obrázek 5.6: 3D-závislost koncentrace $\text{NO}_{x\text{CLD}}[\text{ppm}] = f(n_{\text{mot}}, M_D)$, po aplikaci mediánového faktoru 1, získaná ze **statického** motorového testu



Obrázek 5.7: 3D-závislost koncentrace $\text{NO}_{x\text{CLD}}[\text{ppm}] = f(n_{\text{mot}}, M_D)$, po aplikaci mediánového faktoru 5, získaná ze **statického** motorového testu



Obrázek 5.8: 3D-závislost koncentrace $\text{NO}_{x\text{CLD}}[\text{ppm}] = f(n_{\text{mot}}, M_D)$, po aplikaci mediánového faktoru 10, získaná ze **statického** motorového testu



Obrázek 5.9: 3D-závislost koncentrace $\text{NO}_{x\text{CLD}}[\text{ppm}] = f(n_{\text{mot}}, M_D)$, jako výsledek **regresní** analýzy

Kapitola 6

Závěr a výhled

Ačkoliv má práce navazovala na výsledky a závěry problémů úspěšně řešených před ní, byly uskutečněny poznatky, které mohou tyto výsledky ještě zpřesnit popřípadě doplnit. Jde zejména o problematiku časových zpoždění. Ačkoliv část numerických analýz a výpočtů byla úspěšně provedena a mnohdy i ověřena a jejich výsledky vedly k potvrzení či vyvrácení mnoha hypotéz souvisejících s možnostmi diagnostiky stavu katalyzátoru, z některých výsledků bylo zřejmé, že některé veličiny (vektory) jsou časově zpožděné vzhledem k jiným. Byly tedy sestaveny takové rutiny, které se snažily použitím různých metod odstranit vliv těchto zpoždění.

První z nich nejméně náročná a poměrně spolehlivě fungující byla rutina `regsync` využívající k výpočtu hledaného zpoždění korelačního koeficientu lineární regrese dvou vektorů.

Druhá z nich, která však nevedla k očekávanému cíli, byla rutina `t_dmodul`, se záměrem zpětně odstranit vlivy dopravních zpoždění signálů. To se uskutečňovalo na celkem jednoduché úvaze o změnách rychlostí proudících plynů v souvislosti se změnami pracovních režimů motoru. Bohužel, tento postup sice vedl k výpočtu realistických nekonstantních zpoždění, ale při pokusech o aplikaci na dotčené zpožděné vektory, vždy vedl ke zcela vadným a zkresleným výsledkům. Proto byla tato cesta řešení opuštěna.

Naopak jako velmi praktická (zejména pro účely prvotních pokusů se zpracováním výsledků měření) se ukázala rutina `mansync` vytvořená s cílem co možná nejvíce zrychlit manuální práci při manipulacích s vektory a jejich zobrazováním. Tak byl vytvořen nástroj pro pohodlné operace s až osmi závislostmi v jednom grafickém okně umožňující poměrně neomezené studium průběhu naměřených veličin.

Zjevným nedostatkem všech těchto metod byla však nutnost existence celého souboru měření dané veličiny, aby bylo lze vyhodnotit její průběh. To však znemožňuje použití takové metody pro přímou diagnostiku v reálném čase.

Vzhledem k tomu, že některá kritéria OBD (resp. EOBD) jsou i celkem striktně vázána na čas, lze se důvodně domnívat, že diagnostika využívající těchto metod by byla těžko použitelná. Proto byly učiněny pokusy sestavit takové charakteristiky (3D-závislosti) jednotlivých relevantních veličin na těch nezávislých, které charakterizují pracovní stav motoru. Tyto nezávislé veličiny jsou zřejmě otáčky motoru n_{mot} a odváděný točivý moment M_D .

Na základě této úvahy bylo sestaveno množství matic a několik rutin umožňujících právě výše uvedené výpočty provést bez znalosti celého průběhu sledované veličiny.

Na základě všech těchto částečných výsledků byl tedy vysloven závěr, že studované oblasti a navržené postupy skýtají velký potenciál pro další vyhodnocování a pokud by se je podařilo zkombinovat i s nově provedenými jízdními testy, lze očekávat i konkrétní a přínosné výsledky.

Kapitola 7

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat pánům Haraldu Loeckovi a Kurtu Korbelovi (K-EFVT, Volkswagen AG, Wolfsburg) za zadání této práce a vynikající podporu při jejím vypracování. Obdržel jsem dostatek volnosti pro všechny práce, čímž jsem mohl samostně a bez omezení pracovat.

Zvláštní poděkování patří panu Josefu Laurinovi (TU Liberec) za jeho připomínky a pomoc při závěrečném zpracování této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval paní Martině Gottschling a panu Juan Luis H. Carabiasovi (K-EFVT, Volkswagen AG, Wolfsburg) za cenné rady a pomoc při sestavování německé verze této zprávy, a paní Michelle Truman za konzultace při překladech anglických. Všem ostatním kolegů a spolupracovníkům z oddělení K-EFVT i dalších, kteří se postarali o příjemné a produktivní pracovní klima.

Literatura

- [1] ALLOFS, Klaus: *Erstellen von definiert gealterten Katalysatorkombinationen von Vor- und Hauptkatalysator für die Erprobung von alternativen Katalysator-Diagnoseverfahren bei SULEV-Fahrzügen*. Diplomová práce, Fachhochschule Köln (2001)
- [2] WILLSCH, Mathias: *Weiterentwicklung einer alternativen On-Board-Katalysatordiagnose für Fahrzeugkonzepte mit SULEV-Abgasniveau und ein Vergleich mit der indirekten Sauerstoffspeicher-Methode (OSC)*. Diplomová práce, Technische Fachhochschule Georg Agricola, Bochum (2001)
- [3] ZIMMERMANN, Marko: *Erstellen von gealterten Katalysatoren für die Erprobung von alternativen Katalysatoren-Diagnoseverfahren bei SULEV-Fahrzügen*. Diplomová práce, Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Wolfsburg (2001)
- [4] LINDNER, Klaus: *Einfluss der Ladungsbewegung auf die HC-Emissionen im Kaltstart*. Diplomová práce, Fachhochschule Osnabrück (2001)
- [5] SCHENKE, Marko: *Weiterentwicklung einer alternativen On-Board-Katalysatordiagnose mit NO_x -Sensortechnik und Vergleich mit der Doppel-Lambdasondenmethode für Fahrzeuge mit Ottomotoren*. Diplomová práce, Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Wolfsburg (2000)
- [6] LEIDIG, Daniel: *Entwicklung einer alternativen On-Board-Katalysatordiagnose für Fahrzeugkonzepte mit SULEV-Abgasniveau und ein Vergleich mit der indirekten Sauerstoffspeicher-Methode (OSC)*. Diplomová práce, Fachhochschule Köln (2001)
- [7] KATO, N., KURACHI, H., HAMADA, Y.: *Thick film ZrO_2 NO_x sensor for the measurement of low NO_x concentration*. SAE Technical Paper Series 980170, VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg

- [8] SCHREIBER, G.: *Untersuchungen zur Querempfindlichkeit von NO_x-Sensoren*. Závěrečná zpráva, Universität Kaiserslautern (2000)
- [9] sine nomine: *On-Board-Diagnose 2 in New Beetle (USA)*. Samostatný studijní program 175, VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg (1999)
- [10] sine nomine: *Kfz-Abgasemissionen Zusammensetzung, Verminderung, Normen, ...*. Samostatný studijní program 230, VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg (2000)
- [11] sine nomine: *Euro-On-Board-Diagnose für Ottomotore*. Samostatný studijní program 231, VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg (2000)
- [12] sine nomine: *2,0 l-Motor Konstruktion und Funktion*. Samostatný studijní program 233, VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg (1999)
- [13] NIERHAUVE, Bernd: *Kraftstoffe für Strassenfahrzeuge Grundlagen*. Aral-Forschung, ARAL AG, Bochum (1998)
- [14] NIERHAUVE, Bernd: *Ottokraftstoffe*. Aral-Forschung, ARAL AG, Bochum (1993)
- [15] MENRAD, Holger: *Vorlesungsscript Betriebsstoffe*. Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Wolfsburg (1998)
- [16] MACEK, Jan, SUK, Bohuslav: *Spalovací motory 1*. ČVUT, Praha (1996)
- [17] sine nomine: *ETAS VS 100 Schulungsunterlagen*. ETAS GmbH & Co. KG, Stuttgart (1996)
- [18] HOCK, A.: *ASCET Verfahren für die Katalysatordiagnose als Echtzeitsimulationstool*. Abteilung K-EFE, VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg (1999)
- [19] sine nomine: *DKATSP 1.80 Katalysatordiagnose durch Gemischsprung*. Robert Bosch GmbH, Stuttgart (2000)

Dodatek A

Paliva, spalování a výfukové emise

A.1 Ropa

Paliva pro dnešní silniční vozidla se vyrábějí prakticky výhradně z ropy, z níž spotřebují největší část.

Podle dnešního stavu vědění byla výchozím materiálem pro vznik ropy velká množství mořských mikroorganismů, především řas. Ty žily převážně jako plankton v mořské vodě. Po svém odumření klesly na dno a zetlely, pokud byl dostatek kyslíku. Pokud ovšem kyslík chyběl, zůstaly organické substance zachovány a spolu s nejjemnějšími částicemi horniny vytvořily usazeninu. Vlivem nejrůznějších faktorů se tak neuvěřitelně pomalu vytvořily ropa a zemní plyn. Předpokladem k tomu byly vysoké tlaky a teploty (optimálně mezi 65 °C a 120 °C), které se v hlubších zemských vrstvách vyskytují z přirozených příčin. Tento proces vzniku probíhal od středního paleozoika (devon, ca. před 400 milióny let) až do pozdního mesozoika (křída, ca. před 100 milióny let). Z těchto primárních nalezišť putovaly ropa a zemní plyn skrz jemné póry a trhliny ve vrstvách hornin vzhůru, až narazily na nepropustné vrstvy. Pod nimi se shromažďovaly a vytvořily tak dnes známá naleziště. Ropa díky svému procesu vzniku obsahuje množství nejrůznějších sloučenin uhlíku a vodíku. Vedle toho obsahuje i sloučeniny síry, kyslíku a stopových prvků.

Ropa, jako přirozeně vzniklá látka, je rovněž přirozenou cestou odbouratelná prostřednictvím bakterií (při splnění určitých předpokladů). Každopádně takový proces trvá dlouhou dobu - měsíce či roky.

Při hledání ropy a zemního plynu je třeba si nejprve vytvořit obraz o průběhu podzemních vrstev hornin, aby bylo možno vyhledat potenciální naleziště. Při prvních ropných vrtech v roce 1857 v Rumunsku a v roce 1858 v USA a

Německu (v obci Wietze u města Celle) byla ropa nalezitelná již v hloubce méně než 50 m. Dnes je nutno vrtat 1000 m (v jednotlivých případech dokonce více než 6000 m) hluboko, aby bylo lze narazit na ropu.

Ložiska ropy nedovolují být plně vytěžena. V počátcích těžby ropy (kolem roku 1860) byla úspěchem možnost vytěžit ca. 10-20% přítomné ropy. Dnes lze pomocí sekundárních postupů (jako např. zavodnění) a terciárních těžebních metod (jako např. vtlačování horké páry nebo horké vody při spolupůsobení tenzidů) vytěžit až 50%.

Žádné jiné energetické médium nebo surovinu nelze tak snadno přepravovat, zpracovávat a mnohostranně využívat jako právě ropu. Tyto okolnosti spojené s velkým množstvím nejrůznějších aplikací řadí ropu k nejdůležitějším energetickým médiím a nejvýznamnějším obchodním artiklům světa.

A.2 Rafinace

Závody na zpracování surové ropy se nazývají 'rafinérie', odvozeno z francouzského slova 'fin' (=jemný). Rafinování pak znamená čištění, zlepšení, zušlechťení. A skutečně se v každé rafinérii ropa dělí, přeměňuje a dodatečně upravuje.

cf. obrázky A.1 (p. 63), A.2 (p. 64) a A.3 (p. 64).

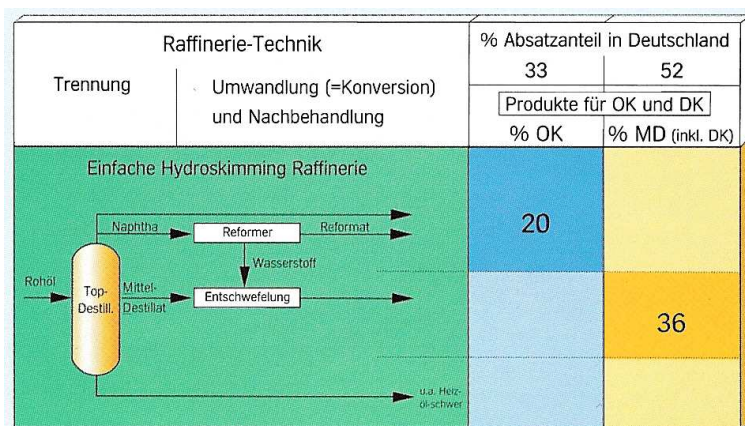
A.2.1 Separace, oddělování

Při separaci (destilací nebo rektifikací) se ropa rozčleňuje do produktových skupin s různými teplotními rozsahy varu a tím s různými velikostmi molekul. Protože ropa je směsí velkého množství velmi různých uhlovodíků, nemá žádný jeden konkrétní bod varu, alebrž varnou křivku.

Jednotlivé frakce získané během destilace nejsou produkty pro koncové spotřebitele. Ty se musí teprve přeměnit v zařízeních pro konverzi a dodatečné úpravy.

Během destilace se ropa nejprve ohřívá v trubkových pecích a tím přivádí do plynné fáze. Plynné součásti ropy pak stoupají vzhůru v rektifikační věži, ochlazují se a jako zkapalněné opět klesají na jednotlivá patra věže. Tyto jednotlivé frakce jsou poté stranově odváděny.

Na nejvyšších patrech rektifikační kolony kondenzují popř. zůstávají plynné (odtud americký pojem *gasoline*) **lehké destiláty**. Tyto surové benzíny nenacházely před vynálezem zážehového motoru žádné efektivní využití a kvůli nebezpečí výbuchu nebyly použitelné ani jako olej na svícení. Proto byly bezúčelně spalovány. Dnes jsou produkty vycházející z této skupiny pravděpodobně nejvýznamější z celé ropné produkce.



Obrázek A.1: Hydroskimming rafinérie [13]

Ve střední oblasti vznikají **střední destiláty** (plynový olej, petrolej), které se hodí pro výrobu nejrůznějších koncových produktů (motorová nafta, lampový olej = petrolej, letecký benzín = kerosin nebo lehký topný olej).

Ty podíly ropy s největšími molekulami zůstávají zcela při dně a tvoří tak zvaný *produkt ze dna* = *zbytek*, který lze při použití speciálních metod ještě dále zpracovávat.

Rektifikace jako fyzikální metoda pro oddělení tekutých fází směsi spočívá v mnohonásobně prováděné destilaci a postupném odvádění frakcí.

Dva typické způsoby rektifikace jsou:

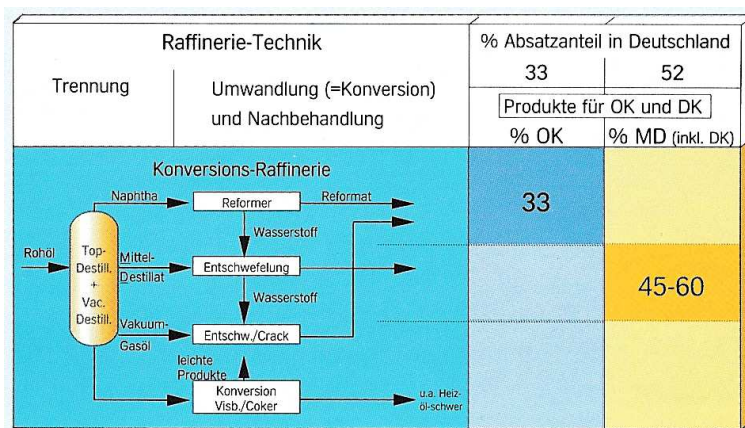
'Top'- popř. 'atmosférická' rektifikace: je nejjednodušší metoda, při které se ropa nejprve ohřeje v trubkové peci na asi 350 °C a přivede do vysoké válcové kolony.

Vakuová rektifikace je metoda, při které lze dále destilovat na jednotlivé složky i produkt ze dna, aniž by hrozilo riziko termického štěpení molekul (*krakování*) některých složek olejů.

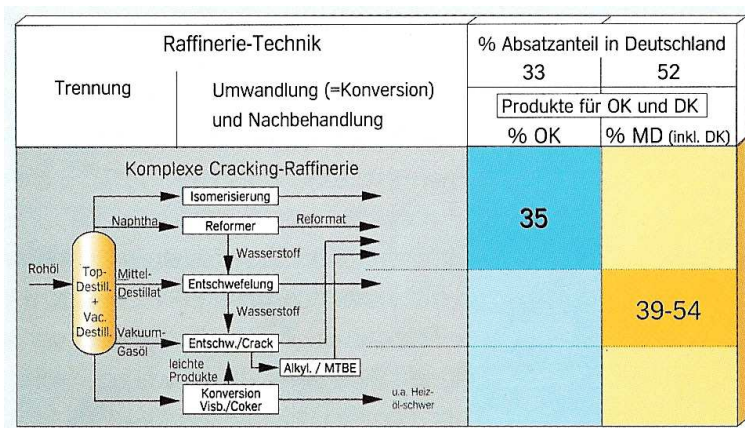
A.2.2 Konverze

Konverze znamená *převedení* a hlavním úkolem tohoto převedení je - prostřednictvím štěpení - dlouhé a těžké molekuly rozbít na kratší a lehčí. Proto se tento proces nazývá rovněž *krakování* z anglického *to crack* = *rozbít* či *štěpit*. Existují tři hlavní varianty krakování:

Tepelné krakování: Nejstarší a nejjednodušší konverzní postup, při kterém se přetrhává část vazeb mezi atomy uhlíku vsazených surovin (zbytků



Obrázek A.2: Konverzní rafinérie [13]



Obrázek A.3: Komplexní krakovací rafinérie [13]

po destilaci) při krátkodobém přehřátí (od asi 360 °C) a za existence tlaku. K této skupině patří také *visbreak* - termické štěpení zbytku po vakuové rektifikaci při vyšších tlacích (kolem 1.5 MPa) a teplotách (ca. 460 °C). Ve visbreakerech se tyto zbytkové produkty zředí.

Katalytické krakování: Štěpení probíhá při asi 500 °C a za přítomnosti katalyzátoru. Výsledkem je směs uhlovodíků od plynného metanu až po koks. S pomocí katalytického krakování se rovněž odstraní část síry obsažené ve vsádce.

Hydrokrakování: Aby bylo možno transformovat dlouhé uhlovodíkové molekuly na frakce s nižším bodem varu a kratšími molekulami, musí se současně přivádět vodík (anglicky *Hydrogen*; z toho *hydrokrakování*) pod vysokým tlakem (od 10 do 15 MPa). Rovněž tato metoda probíhá za přítomnosti různých katalyzátorů. Hydrokrakování je technicky nejelegantnější a nejflexibilnější řešení, současně ale také nejdražší konverzní způsob, vyžadující vlastní výrobu vodíku a speciálně konstruované reaktory (se silou stěny 15 až 20 cm). To vysvětluje, proč v současnosti relativně málo rafinérií má k dispozici tato zařízení.

A.2.3 Dodatečné úpravy a zušlechťování

V tomto posledním rafinačním kroku se uvedou produkty (paliva) do téměř finálního stavu, aby bylo možno je později již jen smísit se značkovými aditivami. Nejdůležitější zušlechťovací postupy jsou:

Odsíření: Síra je přirozená součást ropy, ale při spalovacím procesu je nežádoucí. Pro veškeré následné použití v motorech a jejich systémech zpracování výfukových plynů bude mít co možná nejlepší odsíření zcela zásadní význam. Ropa je zbavována síry v *hydrofinerech* (jedno z nejdůležitějších rafinačních zařízení). Tato reakce probíhá při vysokých teplotách (300 °C až 400 °C) za přítomnosti vhodného katalyzátoru a kontinuálního přivádění vodíku.

Reformování: Především surový benzín z atmosférické rektifikace má velmi nízkou antidetonační odolnost (VOČ 40 až 60). V *reformerech* se polo-produkt (surový benzín) opět zahřívá a za přítomnosti platiny coby katalyzátoru přemění. Při tom ztrácejí nízko-oktanové molekuly některé své atomy vodíku a mění se tak na vysoko-oktanové benzínové molekuly (VOČ 95 až 100).

Uhlovodík (v hm.-%)		počet at.C	SuperPlus ²	Super ³	Normal ⁴
alkany (parafiny)	propan	3	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	butan	4	4.8	4.7	4.2
	pentan	5	18.3	12	12.8
	hexan	6	11.2	12.8	17.3
	heptan	7	5.2	5.8	7.2
	oktan	8	2.1	15.8	15.8
	nonan	9	0.7	1	1.2
	dekan	10	0	0.1	0.1
	Celkem		35–55	40–60	50–65
alkeny (olefiny)	buten	4	0.1	0.4	2.5
	penten	5	0.2	0.1	3.1
	hexen	6	0.1	0.3	4.8
	hepten	7	0.3	0.2	1.2
	okten	8	0.2	< 0.1	1
	nonen	9	0.4	0.7	2
	deken	10	0.2	0.7	1
	Celkem		0–5	0–25	0–35
aromaty (areny)	benzen	6	2.6	2.8	2.2
	toluen	7	7.9	15.1	4.4
	xylén	8	11.1	13.3	5.1
	etylbenzen	8	3.1	1.5	1.8
	C9-aromaty	9	18.3	8.5	10.2
	C10-aromaty	10	0.7	0.2	0.3
	naftalen	10	0.2	< 0.1	< 0.1
	Celkem		0–5	0–25	0–35

Tabulka A.1: Obvyklé chemické složení benzínů

A.3 Paliva pro zážehové motory

V následujícím se bude jednat výhradně o paliva pro zážehové motory. Tyto se nazývají benzíny¹. Typické a průměrné složení dnešních benzínů ukazuje tabulka A.1 (p. 66).

Aby byly použitelné jako paliva pro zážehový motor, musí benzíny splňovat často zcela protichůdné požadavky.

¹odvozeno ze jména německého inženýra Karla Benze, který hledal optimální palivo úsporné na prostor

A.3.1 Požadavky na paliva do zážehových motorů

Následující přehled požadavků na benzíny je rozdělen do čtyř procesních skupin.

Chování během skladování

- dostatečná odolnost proti nízkým i vysokým teplotám
- odolnost proti degradaci stárnutím
- protikoroze ochrana
- známé a zjevné zdroje nebezpečí (ohněň, voda)

Chování před spalováním

- dobrá těkavost (pro dobré startování v širokém teplotním rozsahu), ale ne příliš vysoká, aby se zabránilo zamrznutí
- nevytváření bublinek par
- vhodný průběh křivky varu
- dostatečná odolnost proti chladu
- malý sklon k ředění s mazacím olejem
- snášenlivost s jinými produkty stejné kvality
- snášenlivost s nekovy (elastomery, plastické hmoty, laky)
- žádná tvorba usazenin
- čistota a čistící schopnost

Chování při spalování

- vysoký obsah energie/malá spotřeba
- žádná tvorba usazenin a zbytků
- vysoká odolnost detonačnímu spalování

Chování po spalování

- tvorba co možná nejméně kyselých produktů spalování
- žádné negativní ovlivnění skladby výfukových plynů

²Oficiální název (podle příslušné EN) pro automobilový benzín bezolovnatý s VOČ \geq 98

³Oficiální název (podle příslušné EN) pro automobilový benzín bezolovnatý s VOČ \geq 95

⁴Oficiální název (podle příslušné EN) pro automobilový benzín bezolovnatý s VOČ \geq 90

A.3.2 Metody ke splnění požadavků na benzíny

Zde jsou zmíněny některé možnosti, kterými by mělo být možno splnit tyto nejruznější požadavky. Částečně jde o postupy z poslední fáze rafinace, částečně o použití aditiv, která mohou být přidávány do finálního produktu až po rafinaci.

Odolnost proti degradaci stárnutím: Především jde o inhibitory oxidace (jako např. alkylfenoly a aminy) a deaktivátory kovů (např. fenyl-diamidy), které zlepšují stabilitu při skladování.

Protikorozní ochrana: Těchto vlastností paliv lze dosáhnout především přidáváním povrchově aktivních solí aminů a kyselin. Tyto přísady jsou zvláště důležité pro paliva obsahující alkohol, která mají mnohem vyšší korozní agresivitu.

Zabránění zamrzání: Snížit riziko zamrzání pomáhají přísady na bázi esterů mastných kyselin, aminové soli a alkoholy (popř. glykoly).

Odolnost detonačnímu spalování: Odolností detonačnímu spalování je míněno chování benzínu, při kterém dochází k nežádoucímu, spontánnímu spalování ve spalovacím prostoru motoru. Toto nekontrolované spalování způsobuje tepelné a mechanické přetěžování motoru, které může vést až k poškození motoru (jako např. propálení pístu).

Odolnost detonačnímu spalování toho kterého paliva se určuje experimentálně podle tří srovnávacích testů,⁵ ze kterých se určí jedno ze tří oktanových čísel (OČ): VOČ, MOČ a SOČ (jako kalibrační etalon slouží směs izooktanu a *n*-heptanu. Míra pro oktanové číslo byla zvolena a nachází se mezi 0 a 100. Nejodolnějšímu izooktanu bylo přiřazeno oktanové číslo 100 a nejméně odolnému *n*-heptanu oktanové číslo 0. Oktanová čísla větší než 100 se dnes stanovují stupněm etylizace izooktanu.

Opatření ke zvýšení odolnosti proti detonačnímu spalování jsou:

⁵Všechny tyto testy jsou normovány a standardizovány, aby byly mezinárodně srovnatelné. Dva testy (VM a MM) se provádějí na tzv. *jednoválcovém-CFR* zkušebním motoru.

- **VOČ, výzkumná metoda:** konstantní otáčky 600 min⁻¹, konstantně nastavované zapalování, předehřívání vzduchu 125 °F (≅ 52 °C)
- **MOČ, motorová metoda:** konstantní otáčky 900 min⁻¹, automaticky nastavované zapalování, předehřívání směsi 300 °F (≅ 149 °C)

Protože podmínky pro určení MOČ jsou mnohem přísnější, jsou MOČ nižší než VOČ. Navíc se k těmto dvěma OČ určuje ještě

- **SOČ, silniční metoda:** individuálně v sériových vozech při nejtvrdsích provozních podmínkách. Rovněž zde platí mezinárodně sjednocené postupy tak, aby i SOČ bylo srovnatelné.

- **alkylace**
Při alkylaci se nenasycené, plynné alkeny pomocí izobutanu řetězí a větví na větší alkany s vyšší odolností proti detonačnímu spalování.
- **polymerizace**
Větší množství kratších, plynných a nenasycených uhlovodíkových molekul polymerizují v reaktoru (při teplotě ca. 200 °C a tlaku 8 MPa). Nevýhodu této metody představuje podstatný rozdíl mezi VOČ a MOČ (*sensitivity=citlivost*).
- **TEL** nebo **TML**⁶
Dříve byly používány tyto organické sloučeniny s atomy olova. Protože olovo je na jednu stranu samo toxické a na druhou stranu způsobuje nenávratné poškození katalyzátoru u moderních systémů dodatečného zpracování výfukových plynů, nesmějí být tyto sloučeniny používány.
- **oxygenaty**,⁷
které se dnes používají jako náhrada olova např. alkoholy (metanol nebo etanol) nebo étery (MTBE=metyl-terc-butyleter), které mají velmi vysoká laboratorní oktanová čísla a jsou vyrobitelné z jiných surovin než je ropa.

Zlepšovače hoření: K těmto aditivům patří např. organické sloučeniny fosforu, které podstatně omezují znečištění zapalovacích svíček.

A.4 Tvorba směsi a spalování

Konkrétní technické parametry k měřením použitého motoru jsou v části 3.1, p. 32. Tvorbou směsi se rozumí proces (nebo sled procesů), vedoucích ke vzniku zápalné směsi paliva se vzduchem o požadovaných vlastnostech. Spalováním se pak rozumí takový sled procesů, při kterých se chemická energie vázaná v palivu uvolňuje na energii jinou, především tepelnou.

Tvorba směsi

Dnes používaná paliva do zážehových motorů sestávají z uhlovodíkových molekul, které ke svému hoření potřebují kyslík. Nejrozumnější systémy pro tvorbu zápalné směsi⁸ mají za úkol vytvořit z paliva a vzduchu homogenní směs pro každý pracovní režim motoru. [2].

⁶Jde o olovo-alkyly TEL=Tetra-Ethyl-Lead=tetraetylolovo) a později (od roku ca. 1960) TML=Tetra-Methyl-Lead=tetraetylolovo

⁷oxygenáty jsou kyslíkaté sloučeniny s uhlovodíkovými vazbami

⁸Zážehové motory mají vnější nebo vnitřní tvorbu směsi s cizím zapálením.

Vnější tvorba směsi probíhá v sacím potrubí nebo na sacím ventilu, tzn. vně válce (motory s karburátory a nepřímým vstřikováním benzínu).

Pro spalování nutné minimální množství vzduchu závisí na poměru množství uhlíkových a vodíkových atomů v komponentech paliva. Tato množství lze vypočítat podle stechiometrických zákonů z reakčních rovnic a jako teoretická spotřeba vzduchu vychází:

$$L_{stech} = \frac{m_{vzduchu}}{m_{paliva}} \quad (A.1)$$

$$[L_{stech}] = \frac{kg_{vzduchu}}{kg_{paliva}} = 1$$

Tato hodnota je u zážehových i vznětových motorů mezi 14.6 a 14.9.

Pro úplné spálení je třeba ideálních podmínek. Takové se však ve spalovacím prostoru za normálních okolností nevyskytují. V závislosti na spalovací teplotě, složení paliva, zatížení motoru a především součiniteli přebytku vzduchu λ vystupují jako splodiny i jiné látky (v. obr. A.4 p. 71). Při nedostatku vzduchu je $\lambda < 1$ (*bohatá směs*), při přebytku vzduchu je $\lambda > 1$ (*chudá směs*). Součinitel přebytku vzduchu je definován takto:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{vzduchu}}{\dot{m}_{paliva} \cdot L_{stech}} \quad (A.2)$$

$$[\lambda] = \frac{kg_{vzduchu} \cdot s^{-1}}{kg_{paliva} \cdot s^{-1}} = 1$$

Obvyklé hodnoty součinitele přebytku vzduchu pro zážehové motory jsou mezi 0.9 a 1.1 a pro motory vznětové mezi 1.2 a 6.0.

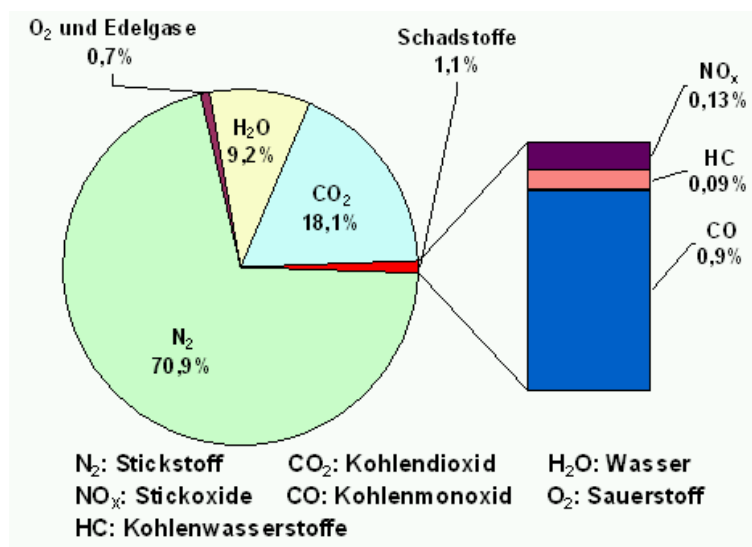
Spalování

Při spalování dochází ke slučování molekul uhlovodíku z paliva s molekulami kyslíku ze vzduchu. Část tepla uvolněného při této chemické reakci je v motoru převedena na mechanickou práci. Největší část tepla se ztrácí nutným chlazením motoru a výfukovými plyny.

Spalování může probíhat jako dokonalé nebo nedokonalé.

Při **dokonalém spalování** se veškeré uhlíkové a vodíkové atomy sloučí s příslušnými počty atomů kyslíku, přičemž vznikají vodní pára a oxid uhličitý.

Při **vnitřní tvorbě směsi** se tato směs tvoří přímo ve válci (motory s přímým vstřikem benzínu). Přitom se mohou tvořit zóny s různě obohacenými vrstvami (*FSI = Fuel Stratified Injection* nebo *GDI = Gasoline Direct Injection*).



Obrázek A.4: Složení výfukových plynů zážehového motoru [2]

Při nedostatku vzduchu během spalování se část atomů uhlíku spaluje pouze na oxid uhelnatý. Potom se jedná o **nedokonalé spalování**. Část přivedené chemické energie se tak nemůže využít a odvádí se výfukem bez užitku ve formě oxidu uhelnatého.

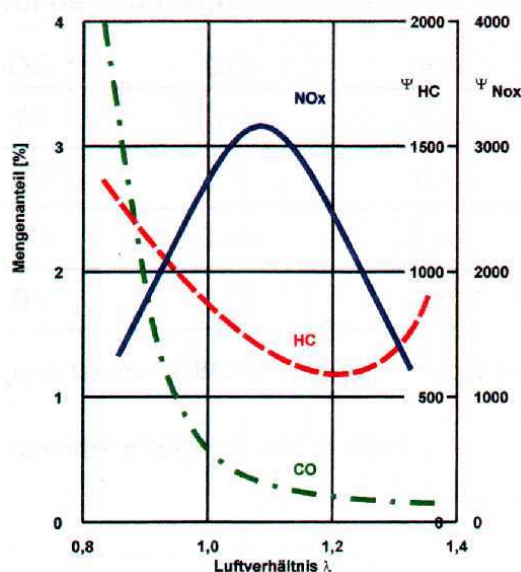
A.5 Výfukové emise

Při dokonalém spálení se veškeré molekuly paliva spálí ve spalovacím prostoru. Výfukové plyny pak sestávají z kyslíku, dusíku, vodní páry a oxidu uhličitého. Ve skutečnosti to však tak není, takže vznikají dále i oxid siřičitý (jako důsledek podílu síry v palivu) a malá množství pevných částic.

A.5.1 Složení výfukových plynů zážehových motorů

Jak již bylo zmíněno výše, při reálném spalovacím procesu nevznikají jen hlavní produkty ideální chemické reakce (H₂O a CO₂), ale také celá řada dalších chemických látek, ať již jako důsledek nedokonalého hoření, nebo jako důsledek přítomnosti i jiných látek a prvků v reaktantech než jen těch ideálních. Ilustrační složení skutečných výfukových plynů nabízí obrázek A.4, p. 71.

Výfukové plyny tak kromě hlavního podílu (ca.98%) neškodných látek obsahují také ca.1.1% podíl látek škodlivých, které jsou zejména ve vyšších koncentracích škodlivé jak pro živé organismy, tak životní prostředí jako



Obrázek A.5: Závislost koncentrací CO, HC a NO_x na součiniteli přebytku vzduchu λ u zážehového motoru [2]

celek. Jejich výčet i působení popisuje následující podkapitola. Zvláštní pozornost si zaslouží zejména protichůdná závislost koncentrací CO a HC na straně jedné a NO_x) na straně druhé na součiniteli přebytku vzduchu λ . Tuto závislost ilustruje obr. A.5, p. 72.

A.5.2 Vlastnosti a působení jednotlivých komponent výfukových plynů na člověka

N₂ - dusík

Je nehořlavý, bezbarvý plyn bez zápachu. Jde o základní součást atmosférického vzduchu (78% dusíku, 21% kyslíku, 1% dalších plynů) a do spalovacího procesu se dostává právě prostřednictvím nasávaného vzduchu. Největší část nasátého dusíku vystupuje ze spalovacího procesu opět v čisté formě ven. Jen malá část se podílí na reakcích s kyslíkem za vzniku oxidů dusíku (NO_x).

O₂ - kyslík

Je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Je nejdůležitější součástí atmosférického vzduchu (21%) jak z hlediska živých organismů, tak i z hlediska chemických dějů. Nasává se (spolu s dusíkem) sacím potrubím přes vzduchový filtr.

H₂O - voda

Je z části nasávána do motoru z atmosférického vzduchu jako vzdušná vlhkost, nebo vzniká při procesu hoření. Jde o neodmyslitelnou součást výfukových emisí.

NO_x - oxidy dusíku

Jsou sloučeniny dusíku N₂ a kyslíku O₂ a jde zejména o tyto tři základní oxidy:

- NO - oxid dusnatý
- NO₂ - oxid dusičitý
- N₂O - oxid dusný

Vznikají zejména díky vysokému tlaku, vysoké teplotě a přebytku kyslíku během spalovacího procesu v motoru. Některé z oxidů dusíku jsou přímo zdraví škodlivé. Opatření vedoucí ke snížení spotřeby pohonných hmot mají bohužel často za následek nárůst koncentrací oxidů dusíku ve výfuku, protože efektivní hoření probíhá při vyšších teplotách.

CO - oxid uhelnatý

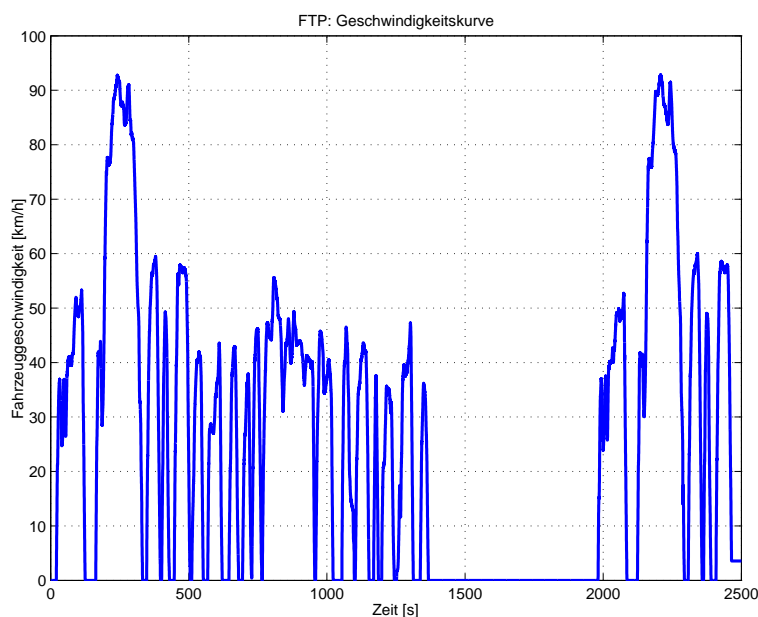
Je to bezbarvý plyn bez zápachu, výbušný a zejména toxický. Vzniká při nedokonalém hoření uhlovodíkových paliv. Jeho jedovatost je způsobena blokováním krevního barviva hemoglobinu, neboť se s ním váže ca. 200 krát silněji než kyslík. Již poměrně malé koncentrace ve vdechovaném vzduchu jsou smrtelné. Za normálních podmínek (a v obvyklých koncentracích) v krátké době oxiduje na CO₂ - oxid uhličitý.

CO₂ - oxid uhličitý

Je bezbarvý nehořlavý plyn. Vzniká při spalování uhlovodíkových paliv (např. benzín či nafta). Ačkoliv je sám neškodný, jeho intenzivní produkce vede ke změnám klimatu (skleníkový efekt), čímž je téma CO₂-emisí stále častěji řešenou problematikou.

Pb - olovo

Jako těžký a jedovatý kov již zcela zmizelo z výfukových emisí. Pomocí jeho sloučenin se zvyšovala odolnost paliv detonačnímu spalování. Použitím ekologicky šetrnějších náhrad bylo možno tyto vlastnosti paliv zachovat.



Obrázek A.6: Rychlostní charakteristika testu FTP

PM - pevné částice

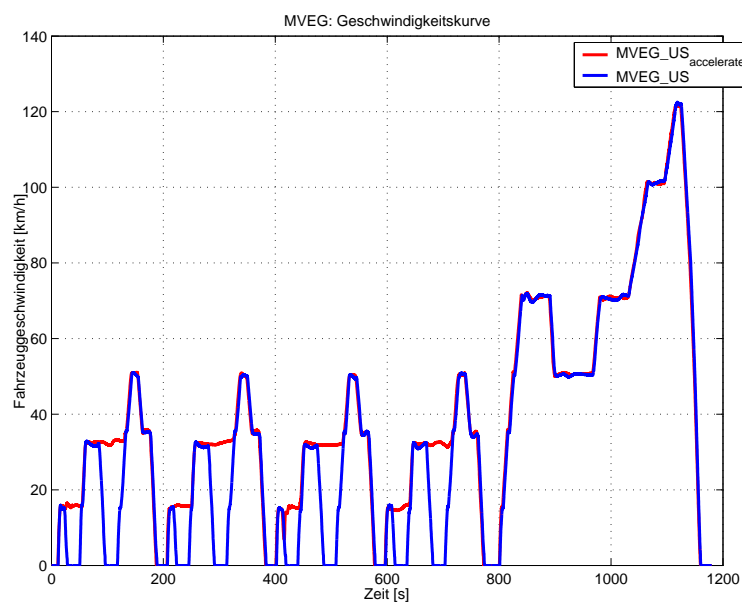
Jsou především problémem vznětových motorů. Jejich negativní působení na lidský organismus není ještě zcela prozkoumáno. Jejich zvýšené koncentrace v ovzduší větších aglomerací vedou k lokálním klimatickým změnám.

SO₂ - oxid siřičitý

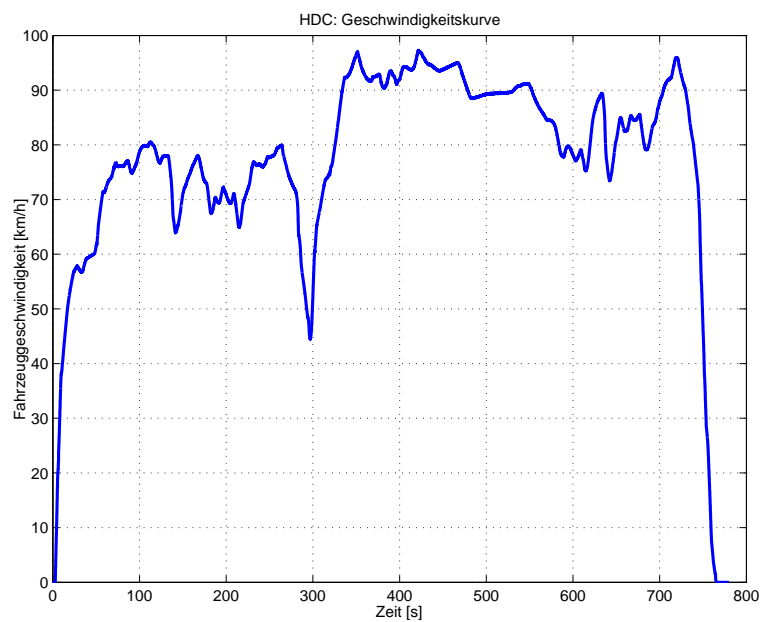
Je bezbarvý, štiplavě zapáchající, nehořlavý plyn. Způsobuje onemocnění dýchacích cest. Ve výfukových plynech však vzniká jen ve velice malých množstvích. Díky snižování množství síry v palivech se jeho emise dále snižují.

HC - uhlovodíky

Jsou nespálené podíly z přiváděného paliva, které se vyskytují ve výfukových plynech při nedokonalém spalování. Vystupují jako nejrůznější sloučeniny (např. C₆H₆, C₈H₁₈) a mají rovněž nejrůznější účinky na organismus: některé dráždí smyslové orgány, jiné mají prokázané karcinogenní účinky (např. benzen).



Obrázek A.7: Rychlostní charakteristika testu MVEG



Obrázek A.8: Rychlostní charakteristika testu HDC

A.5.3 Emisní zákonodárství

Státní a zákonodárské orgány se začaly o výfukové emise zajímat nejprve zhruba v 70. letech 20. století v Kalifornii v USA. Jejich zákonná opatření postupně přejímaly ostatní státy USA a potom i státy evropské a Japonsko. Od této doby se limity neustále postupně zpřísňují a to zhruba ve stejném trendu jakým probíhalo zavádění těchto omezení. Přímé srovnání mezi limity EU a USA je však těžko realizovatelné, neboť existuje množství rozdílů v přístupech k jejich měření a vyhodnocování, vyplývající mnohdy i z odlišných geografických a demografických podmínek jednotlivých států.

V současné době se již i tak poměrně přísné emisní limity ještě neustále zpřísňují, což nutí výrobce vozidel používat a vyvíjet stále efektivnější pohonné agregáty, ale také používat stále komplexnější systémy dodatečného zpracování výfukových plynů ve vozidle. Zákonodárci také stále častěji předepisují používat takové systémy dohledu nad funkcí jednotlivých komponent, což je ale mnohdy kompenzováno poněkud méně přísnými emisními limity (cf. tab. A.2, p. 77 a tab. A.3, p. 78).

Nejpoužívanějšími jízdními testy pro podobné účely jsou:

- **FTP**: označovaný někdy též jako **FTP75**. Obsahuje i 10 min část, při které je vozidlo (a motor) v klidu
- **MVEG**: označovaný rovněž jako **NEFZ** včetně dvou svých alternativ:
 - **NEFZ1992**: s maximálně 40 s chodem motoru naprázdno před započtím sběru dat
 - **NEFZ2000**: se sběrem dat od okamžiku startu motoru

Předsatvu o jeho průběhu nabízí rychlostní křivka na obr. A.7, p. 75.

- **HDC**: test, který simuluje především jízdu po dálnici nebo rychlostní komunikaci. Rychlostní křivka tohoto testu je na obr. A.8, p. 75.

Emisní kategorie	Vzdálenost [mi]	NMOG [g/mi]	CO [g/mi]	NO _x [g/mi]	Diesel PM [g/mi]	OBD NMOG [g/mi]
TLEV	50000	0.125	3.4	0.4	0.08	0.1875
	120000	0.156	4.2	0.6		
LEV	50000	0.075	3.4	0.2	0.08	0.1125
	120000	0.09	4.2	0.3		
ULEV	50000	0.04	1.7	0.2	0.04	0.06
	120000	0.055	2.1	0.3		

Tabulka A.2: Kalifornské emisní limity pro osobní vozidla platné do roku výroby 2000. [1]

Emisní kategorie	Vzdálenost [mi]	NMOG [g/mi]	CO [g/mi]	NO _x [g/mi]	Diesel PM [g/mi]	OBD NMOG [g/mi]	OBD NO _x [g/mi]
TLEV	50000	0.125	3.4	0.4		0.21875	0.7
	120000	0.156	4.2	0.6	0.04	0.273	1.05
LEV	50000	0.075	3.4	0.05		0.13125	0.0875
	120000	0.09	4.2	0.07	0.01	0.1575	0.1225
ULEV	50000	0.04	1.7	0.05		0.07	0.0875
	120000	0.055	2.1	0.07	0.01	0.09625	0.1225
SULEV	120000	0.01	1	0.02	0.01	0.0175	0.035

Tabulka A.3: Kalifornské emisní limity pro osobní vozidla bez i s OBD platné od roku výroby 2004. [1]

Dodatek B

Seznam vytvořených programů a rutin

AEG_NO2S %AEG_NO2S(Nmot, Md) compute the NO2-values [g/kWh] from [rpm] and torque [Nm] for engine AEG

AEG_NOX %AEG_NOX(Nmot, Md) compute the NOx-values [ppm] from [rpm] and torque [Nm] for engine AEG

AEG_NOXD %AEG_NOXD(Nmot, Md, BASE) compute the NOx-values [ppm] from [rpm] and torque [Nm] for engine AEG

AEG_NOXS %AEG_NOXS(Nmot, Md) compute the NOx-values [ppm] from [rpm] and torque [Nm] for engine AEG

AEG_TEMP %AEG_TEMP(Nmot, Md) compute the exhaust-temperature-values [C] from [rpm] and torque [Nm]

F1STNAN %F1STNAN(X,R,C) Finds the first NaN element in 3D-matrices.

FILT_MOR %FILT_MOR Returns the indices of that elements, which are positive and preceeding

FINDNEAR %FINDNEAR In array finds the nearest value

FIT %FIT Extends an array by given number of columns.

HISTPLOT %HISTPLOT Reordered Minima/Maxima and data of 3D-dependencies.

INTERFIT %INTERFIT Interpolates the empty (NaN) elements in mesh matrix

MAP3D %MAP3D(X) Returns a 2D-matrix which maps the first NaN in the 3rd dimension.

NAN2ZERO %NAN2ZERO(X) Returns the same array, but the NaN(Not-A-Number) values replaces with 0(zero)

ROUNDFIX %ROUNDFIX Rounds towards integer or to given number of valid digits.

TESTSIZE %TESTSIZE Test of dimensions' equivalence

ZERO2NAN %ZERO2NAN(X) Returns the same array, but the 0(zero)

values replaces with NaN(Not-A-Number)
ZIGZAGR %ZIGZAGR Reads the zig-zag ordered matrix
ZIGZAGW %ZIGZAGW Writes the zig-zag ordered matrix

Dodatek C

CD-ROM

Na přiloženém CD-ROM je uložena tato práce v elektronické podobě ve formátu ADOBE® POSTSCRIPT® i ADOBE® PORTABLE DOCUMENT FORMAT®. Oba tyto dokumenty jsou identické a narozdíl od tištěné verze jsou barevné.